



中华人民共和国国家标准

GB/T 20840.102—2020

互感器 第 102 部分：带有电磁式电压 互感器的变电站中的铁磁谐振

Instrument transformers—Part 102: Ferroresonance oscillations
in substations with inductive voltage transformers

(IEC TR 61869-102:2014, MOD)

2020-03-31 发布

2020-10-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 V

引言 VII

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 铁磁谐振概述 1

 3.1 基本原理 1

 3.2 稳态和非稳态铁磁谐振的激发 3

4 单相和三相铁磁谐振 4

 4.1 单相铁磁谐振 4

 4.2 单相铁磁谐振的等效电路 6

 4.3 电容式电压互感器铁磁谐振 7

 4.4 三相铁磁谐振 7

5 铁磁谐振实例..... 11

6 电磁式电压互感器(关键部件)..... 11

7 单相铁磁谐振电路..... 13

 7.1 铁磁谐振仿真电路 13

 7.2 磁化特性 13

 7.3 回路损耗 14

8 铁磁谐振研究分析的必要信息..... 14

 8.1 概述 14

 8.2 单相铁磁谐振 15

 8.3 三相铁磁谐振 15

9 铁磁谐振的计算机仿真..... 16

 9.1 概述 16

 9.2 电路及元件 16

 9.3 回路损耗 17

 9.4 单相铁磁谐振仿真示例 17

 9.5 三相铁磁谐振仿真电路 20

10 实验研究、方法和实际测量..... 20

 10.1 概述 20

 10.2 单相铁磁谐振 20

 10.3 三相铁磁谐振 22

11 铁磁谐振的防止和抑制 23

 11.1 抑制措施流程图 23

 11.2 运行变电站 25

11.3 新建工程	25
11.4 防止铁磁谐振	25
11.5 阻尼铁磁谐振	25
附录 A (资料性附录) 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 相比的结构变化情况	32
附录 B (资料性附录) 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的技术性差异及其原因	34
附录 C (资料性附录) 铁磁谐振实例	35
附录 D (资料性附录) 非线性电路振荡	40
参考文献	44
图 1 一种典型的铁芯磁化特性示例	2
图 2 简单的铁磁谐振电路原理图	2
图 3 单相三分之一分频铁磁谐振	3
图 4 停电出线电压互感器发生单相铁磁谐振示意图	5
图 5 平行架空线路相间耦合电容导致单相铁磁谐振电路图	5
图 6 单相铁磁谐振电路原理图	6
图 7 易于发生三相铁磁谐振的中性点不接地系统示意图	7
图 8 中性点振荡向量图	8
图 9 试验系统示意图	9
图 10 电容与电压坐标下当电阻为 $6.7\ \Omega$ 时试验得到的基频和分频铁磁谐振区域	9
图 11 试验中不同电阻对应的二分之一分频铁磁谐振区域	10
图 12 电容与电压坐标下试验系统中当电阻为 $6.7\ \Omega$ 时不同模式的二次分频谐振发生区域	10
图 13 三相铁磁谐振故障录波	11
图 14 电压互感器电路示意图及简化的铁磁谐振分析图	12
图 15 单相铁磁谐振仿真电路图	13
图 16 电压互感器 50 Hz 下的磁滞曲线	14
图 17 三相铁磁谐振示意图	16
图 18 五分之一分频(10 Hz)衰减铁磁谐振波形	17
图 19 基频稳态铁磁谐振	18
图 20 10 Hz 稳态铁磁谐振	19
图 21 稳态混频铁磁谐振	19
图 22 电压互感器一次绕组电流测量系统及二次绕组电压测量系统	21
图 23 220 kV 系统三分之一谐波(50/3 Hz)稳态单相谐振波形例子	21
图 24 示波器测量三相铁磁谐振	22
图 25 铁磁谐振分析及防止方法流程图	24
图 26 电压互感器二次绕组加装阻尼设备电路图	26
图 27 三分之一一次单相铁磁谐振(50/3 Hz)阻尼例子	27
图 28 出线间隔电压互感器开口三角形阻尼抑制铁磁谐振方法	28
图 29 变压器二次侧中性点加装阻尼装置抑制铁磁谐振阻尼方法	29
图 30 互感器一次侧中性点加装电压互感器抑制铁磁谐振阻尼方法	30
图 31 互感器一次侧中性点加装消谐电阻抑制铁磁谐振阻尼方法	31
图 C.1 某变电站单相铁磁谐振接线示意图	35
图 C.2 图 C.1 中所示断路器断开后引起的单相铁磁谐振振荡波形	36

图 C.3 单相 60 kV 电压等级三个变电站单相网络示意图 36

图 C.4 两变电站间架空线同塔架线示意图 37

图 C.5 在 2 号变电站线路 5 上记录到的铁磁谐振波形 37

图 C.6 在开关动作时发生三相铁磁谐振的 170 kV 变电站(左侧)及 12 kV 变电站(右侧)单线图 38

图 C.7 T04 电压互感器上的三相铁磁谐振波形 38

图 D.1 铁磁谐振简化电路图 40

图 D.2 二阶非线性微分方程推导图 42

图 D.3 一个非线性谐振系统 43

表 1 激励的类型和铁磁谐振可能的发展趋势 3

表 2 参数 15

表 A.1 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 章条编号对照情况 32

表 A.2 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的图编号对照情况 32

表 B.1 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的技术性差异及其原因 34

前 言

GB/T 20840《互感器》分为以下部分：

- 第1部分：通用技术要求；
- 第2部分：电流互感器的补充技术要求；
- 第3部分：电磁式电压互感器的补充技术要求；
- 第4部分：组合互感器的补充技术要求；
- 第5部分：电容式电压互感器的补充技术要求；
- 第6部分：低功率互感器的补充通用技术要求；
- 第7部分：电子式电压互感器；
- 第8部分：电子式电流互感器；
- 第9部分：互感器的数字接口；
- 第102部分：带有电磁式电压互感器的变电站中的铁磁谐振；
- 第103部分：互感器在电能质量测量中的应用。

本部分为 GB/T 20840 的第 102 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用重新起草法修改采用 IEC TR 61869-102:2014《互感器 第 102 部分：带有电磁式电压互感器的变电站中的铁磁谐振》。

本部分与 IEC TR 61869-102:2014 相比在结构上有所调整，附录 A 中列出了本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的章、条、图编号的对照一览表。

本部分与 IEC TR 61869-102:2014 相比存在技术性差异，这些差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(┆)进行了标示，附录 B 中给出了相应技术性差异及其原因的一览表。

本部分还做了下列编辑性修改：

- 9.3 中所提及的 6.3 序号有误，将其更正为 7.3；
- 将 IEC TR 61869-102:2014 中的两种三相端子标志“L1、L2、L3”及“R、S、T”均改为“A、B、C”；
- 将中性点对地电容电压符号 U_C 改为 U_{C0} ；
- 将中性点电压由“e-n”改为“ $3U_0$ ”；
- 将带余数的分数表达改为无余数的分数表达，如“ $16^2/3$ Hz”改为“ $50/3$ Hz”；
- 将 IEC TR 61869-102:2014 图 17 中的线路截面图标由彩色填充改为花纹填充(见附录 C 图 C.4)；
- 对参考文献进行了调整，并增加了 IEC 61869-3 和 IEC 61869-4；
- 将 IEC TR 61869-102:2014 的 A.2 中引用的 IEC 标准改为对应的国标(见 D.2)；
- 将 IEC TR 61869-102:2014 的电压互感器一次、二次端子标志统一改为“A、N”与“a、n”；
- 将 IEC TR 61869-102:2014 的电流互感器一次、二次端子标志由“K、L”与“k、l”改为“P1、P2”与“s1、s2”。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国互感器标准化技术委员会(SAC/TC 222)归口。

本部分起草单位：国网陕西省电力公司电力科学研究院、沈阳变压器研究院股份有限公司、中国电力科学研究院有限公司、云南电网有限责任公司电力科学研究院、特变电工康嘉(沈阳)互感器有限责任公司、大连第一互感器有限责任公司、大连北方互感器集团有限公司、江苏科兴电器有限公司、浙江天际互感器有限公司、江苏靖江互感器股份有限公司、重庆山城电器厂有限公司、江西赣电电气有限公司、大

连华亿电力电器有限公司、国网吉林省电力有限公司电力科学研究院、国网江西省电力有限公司电力科学研究院、国网上海市电力公司电力科学研究院。

本部分主要起草人：王荆、韩彦华、章忠国、王晓琪、吴经锋、杨晓西、刘红文、刘玉凤、沙玉洲、王仁焘、任婷、刘彬、杨峰、唐福新、熊江咏、徐文、张爱民、李涛昌、王继元、刘翔、张本帅、蔡强、赵世祥、晏年平、陈文中。

引 言

自 20 世纪上半叶起,很多学者开展了铁磁谐振现象的研究。R.Rüdenberg 主要研究了基频谐振^[1],其他学者研究了高频和分频谐振。其后 K.Heuck 和 K.D.Dettmann^[2]对这一现象进行了详细汇总介绍。Bergmann^[3,4]进行了各种铁磁谐振的基本试验,其研究结果被广泛引用。Germa N.、Mastero S.和 Vroman J.在 1974 CIGRE 会议上发表了有关的综述文章^[5]。

在过去的 20 年中,依据 IEC 61869-3 的电磁式电压互感器和 IEC 61869-4 的组合式互感器在变电站中的铁磁谐振问题在国际大电网工作组和美国的 IEEE 委员会均进行过讨论。讨论结果刊登在大电网技术报告^[5]和 IEEE 出版物^[6]上。

这些出版物的发表是因为变电站中频繁发生铁磁谐振,因此需要开发更加高效的系统和设备。

这个发展趋势会导致如下结果:

- a) 设备的额定电压 U_{pr} 向设备允许的最高电压 U_m 转移(IEC 60071-1^[7]);
- b) 通过减小电磁式电压互感器的铁芯截面增大磁通密度 B ;
- c) 通过使用新的设备(如中压和高压互感器)减小变电站的电容导致非线性电路的激磁电压提高;
- d) 使用负荷大约为 1VA 的数字式仪表和继电器,变电站的实际负荷减小,而对电磁式电压互感器还一直规定较高的二次负荷(从 50 VA 到 400 VA)。然而,实际上这些高的负荷通常也不足以导致铁磁谐振的发生。

互感器 第 102 部分:带有电磁式电压 互感器的变电站中的铁磁谐振

1 范围

GB/T 20840 的本部分给出了带有电磁式电压互感器变电站中铁磁谐振现象原理、实例、分析及抑制方法的介绍。电磁式电压互感器及其他非线性电感元件会导致铁磁谐振,铁磁谐振会给电磁式电压互感器和其他设备带来极大的危害。

本部分适用于指导电网中铁磁谐振的计算、仿真、实验、测量以及防止和抑制措施。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 20840.3—2013 互感器 第 3 部分:电磁式电压互感器的补充技术要求(IEC 61869-3:2011,MOD)

GB/T 20840.5 互感器 第 5 部分:电容式电压互感器的补充技术要求(GB/T 20840.5—2013,IEC 61869-5:2011,MOD)

3 铁磁谐振概述

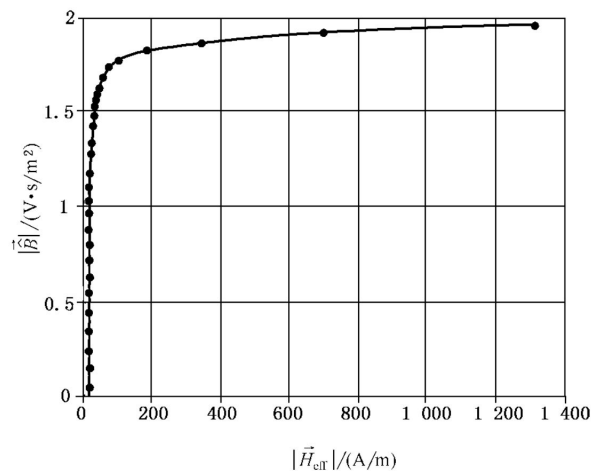
3.1 基本原理

铁磁谐振是一种非线性振荡,在带铁芯的电感元件、电容和交流电压源组成的系统中开关操作、甩负荷及线路故障等情况时可能发生。

铁芯饱和是造成铁磁谐振的主要原因。如果电磁式电压互感器工作磁通密度超过其饱和磁通密度 \vec{B}_s ,磁场强度 \vec{H}_{eff} 和磁通密度 B 将呈非线性关系,见图 1,其感抗 \vec{B} 急剧减小,这对铁磁谐振的产生起重要作用。

铁磁谐振一般发生在高、中压变电站或其他局部电网中。例如:当电磁式电压互感器的高压绕组与电容串联连接到交流电压源的系统中时,可能发生单相铁磁谐振,见图 2,当变压器的低压侧中性点不接地时,可能发生三相铁磁谐振。

以上是发生铁磁谐振的基本情况。铁磁谐振也可能发生在复杂的电网中。

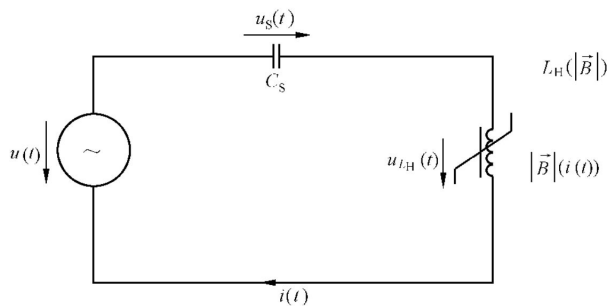


说明：

$|\vec{B}|$ ——铁芯磁通密度峰值；
 $|\vec{H}_{\text{eff}}|$ ——铁芯磁场强度有效值。

注：曲线为冷轧硅钢片磁化特性曲线，摘自参考文献[8]，经 ewz/CH 许可。

图 1 一种典型的铁芯磁化特性示例



说明：

$u(t)$ ——交流电压源；
 $u_s(t)$ ——串联电容电压；
 $u_{LH}(t)$ ——电压互感器电压；
 $i(t)$ ——回路电流；
 C_s ——串联电容；
 $|\vec{B}|(i(t))$ ——磁通密度函数；
 $L_H(|\vec{B}|)$ ——电压互感器的非线性电感。

注：摘自参考文献[8]，经 ewz/CH 许可。

图 2 简单的铁磁谐振电路原理图

实际上，发生铁磁谐振的网络通常包括其他高压设备，它们对于铁磁谐振的发生也起到重要的作用。

电磁式电压互感器在饱和区具有较低的感抗，大的励磁电流会使串联电容上电荷的极性快速反转，进入谐振状态。

即使电磁式电压互感器没有饱和，由变电站附近的谐振电路引发的振荡也可能发生，这种线性振荡的频率通常为基频，波形为正弦波。

从非线性谐振理论和现代稳定性理论^[9]来说，稳态谐振系统需包含等值电容、非线性电感和交流电

源(提供系统损耗能量)。该系统中的非线性元件就是电磁式电压互感器的主电感。当电压增大时,由于磁通密度的饱和特性时间函数 $\vec{B}(t)=f(\vec{H}(t))$,系统发生非线性谐振。这一函数关系受铁磁材料的磁化回线影响,是一个非线性时不变系统函数(函数与时间无关,由限制特征表示)^[10]。

确定是否发生稳态非线性谐振的主要困难在于,对地电容 C_0 、系统等值电容,尤其是变电站的损耗(包括敞开式变电站的瓷或复合绝缘子的泄漏电流等)不易确定,一般采用估计值。

在变电站的规划阶段,应联合开关、互感器设备厂家、系统运维人员对铁磁谐振影响及抑制措施经济性进行讨论,提供最经济的解决方案^[9]。这种研究非常有价值。对于已投运变电站,如果铁磁谐振是由于耦合电容、断路器的断口电容或者是电磁式电压互感器而引起的,则要消除铁磁谐振的成本较大。

3.2 稳态和非稳态铁磁谐振的激发

铁磁谐振能够被小干扰逐渐激发(“弱激励”),这类谐振初始幅值较低。而更多的情况下,铁磁谐振是在开关操作等所引起的暂态过程中由于铁芯饱和而激发的(“强激励”)。

表 1^[8]给出了两种激励情况以及可能的铁磁谐振的发展趋势。

表 1 激励的类型和铁磁谐振可能的发展趋势

激励的类型	铁磁谐振可能的发展趋势
弱激励 当铁磁谐振条件满足时振荡缓慢增加	1a: 稳态铁磁谐振 1b: 逐渐增强的非稳态铁磁谐振
强激励 当开关操作或间歇性接地故障时铁芯突然饱和	2a: 稳态铁磁谐振 2b: 逐渐增强的非稳态铁磁谐振 2c: 逐渐衰减的非稳态铁磁谐振

铁磁谐振可分为稳态或非稳态两种类型,见图 3,其中非稳态谐振的幅值可能不断增强或者逐渐衰减。幅值增强的铁磁谐振会造成电磁式电压互感器的热击穿或者变电设备闪络。

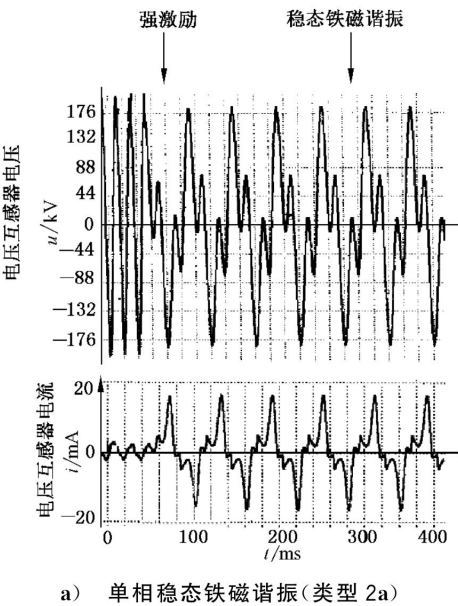
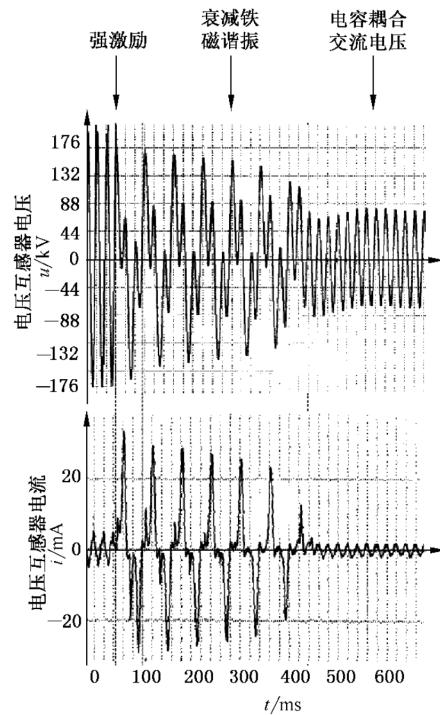


图 3 单相三分之一分频铁磁谐振



b) 单相衰减的铁磁谐振(类型 2c)

注：摘自参考文献[8]，经 Amprion 许可。

图 3 (续)

幅值衰减的铁磁谐振不会导致电压互感器的损坏。稳态铁磁谐振会使一次绕组中电流增大并最终因过热损坏互感器。幅值增加的铁磁谐振的危害性显而易见。

图 3a) 是强激励(开关操作)下发生稳态铁磁谐振时的互感器一次绕组中的电流、电压波形；图 3b) 是幅值衰减的非稳态铁磁谐振时的波形。

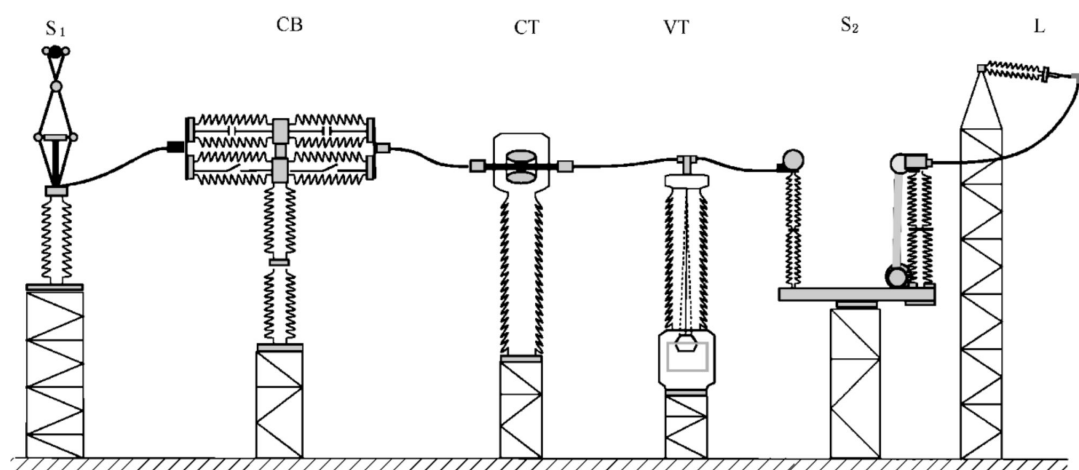
幅值衰减的铁磁谐振的发生[如图 3b)]是随机事件，比如与开关动作的时刻有关。

4 单相和三相铁磁谐振

4.1 单相铁磁谐振

单相、不带电、不接地的部分电网系统，如果其中包括一台或多台电磁式电压互感器，则可能会被相邻的带电设备通过断口电容 C_0 激发出谐振。单相铁磁谐振可以发生在所有系统中，与中性点是否接地无关。

图 4 所示为开关操作引起单相铁磁谐振的一个例子。图中所示是某一敞开式变电站的出线间隔，电压通过断开的断路器断口电容耦合到停电侧。



说明：

S_1 ——隔离开关，合位；

CB ——断路器，分位；

CT ——电流互感器；

VT ——电压互感器；

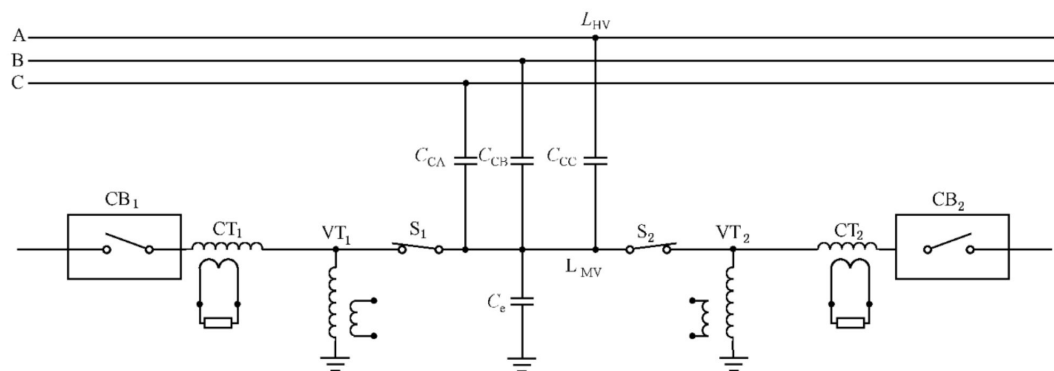
S_2 ——出线隔离开关，分位；

L ——变电站出线，接地。

注：摘自参考文献[8]，经 ewz/CH 许可。

图4 停电出线电压互感器发生单相铁磁谐振示意图

图5是另外一种会导致铁磁谐振的情况，停电的中压线路与带电的高压线路同塔架设，不带电系统的各相不接地且一端或两端连接有电压互感器。由于带电线路和不带电线路间的电容耦合，因此在某些情况下激发出铁磁谐振，各相铁磁谐振彼此独立发生。



说明：

L_{MV} ——中压架空线路中故障相(谐振相)；

L_{HV} ——高压架空线路；

C_{CA} 、 C_{CB} 、 C_{CC} ——中压线路故障相(谐振相)与高压线路各相之间的相间耦合电容；

C_e ——对地电容；

CT_1 、 CT_2 ——电流互感器(TA)；

VT_1 、 VT_2 ——电压互感器(TV)；

CB_1 、 CB_2 ——断路器，开路；

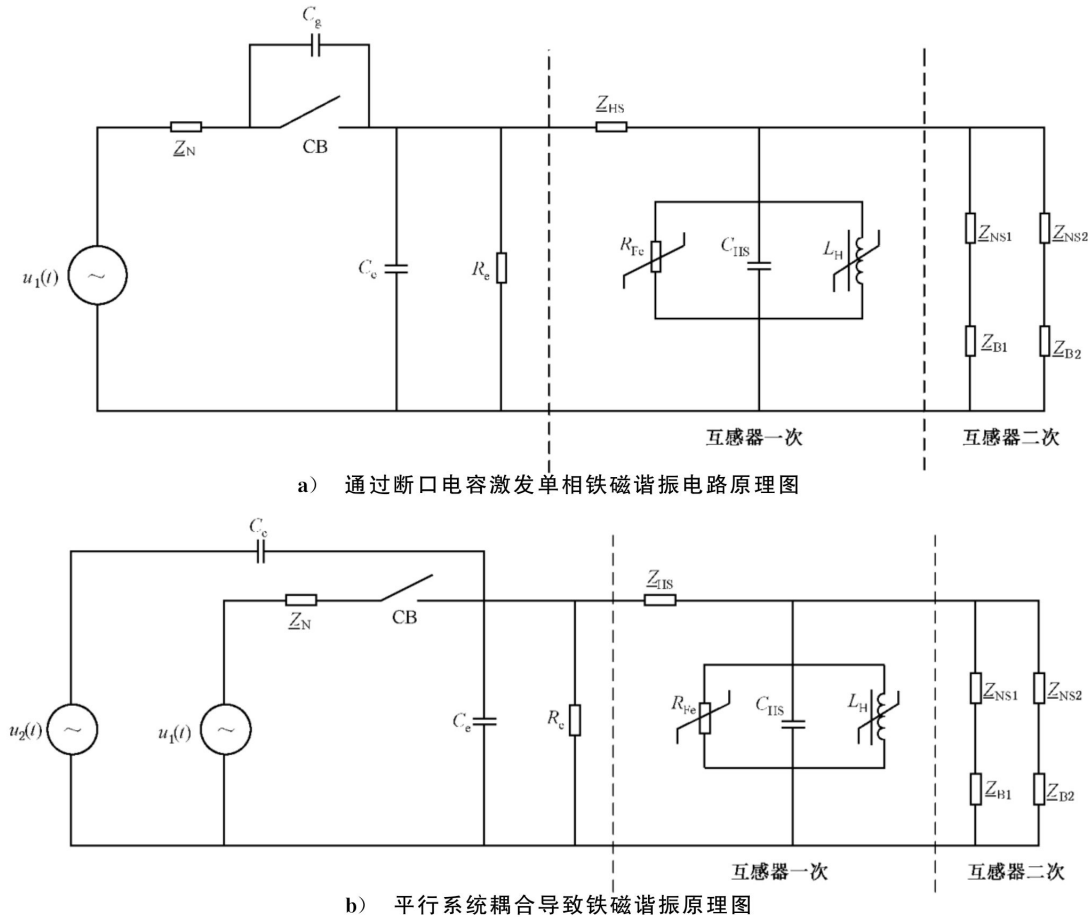
S_1 、 S_2 ——隔离开关，闭合。

注：摘自参考文献[8]，经 ewz/CH 许可。

图5 平行架空线路相间耦合电容导致单相铁磁谐振电路图

4.2 单相铁磁谐振的等效电路

对于铁磁谐振的理论分析,前面所述情况和原理图尚不完整,为了预测铁磁谐振,有必要对电气元件及其特性进行详细的定义和描述。图 6a)和图 6b)分别给出了图 4、图 5 中所示两种不同的激励方式下的单相铁磁谐振原理图,将在第 9 章中通过算例详细说明分析和仿真方法。



说明:

- C_e —— 总对地电容;
- C_{HS} —— 互感器高压绕组电容;
- C_c —— 对高压线路耦合电容;
- C_g —— 断路器 CB 的断口电容;
- CB —— 断路器;
- R_e —— 相对地总绝缘电阻(互感器内部对地绝缘电阻,非线性泄漏电阻,如:由于表面泄漏电流,电晕电流以及避雷器泄漏电流引起);
- R_{Fe} —— 电压互感器铁损等效电阻;
- L_H —— 电压互感器高压绕组电感;
- $u_1(t)$ —— 系统相对地电压;
- $u_2(t)$ —— 平行系统电压;
- Z_{B1} —— 二次侧第一绕组负荷阻抗;
- Z_{B2} —— 二次侧第二绕组负荷阻抗;
- Z_{HS} —— 高压绕组电阻和漏电抗;
- Z_N —— 网络等值阻抗;
- Z_{NS1} —— 二次侧第一绕组电阻和漏电抗;
- Z_{NS2} —— 二次侧第二绕组电阻和漏电抗。

注:摘自参考文献[8],经 ewz/CH 许可。

图 6 单相铁磁谐振电路原理图

4.3 电容式电压互感器铁磁谐振

常规的电容式电压互感器具有中间变压器和补偿电抗器,连同高、中压电容,形成了铁磁谐振回路,无需额外串联电容就可产生铁磁谐振。设计电容式电压互感器时应该避免在任一运行情况下产生稳态铁磁谐振。

在电容式电压互感器中常用 LC 谐振回路抑制三分之一、五分之一和七分之一等分频铁磁谐振,该回路在工频下为低损耗。

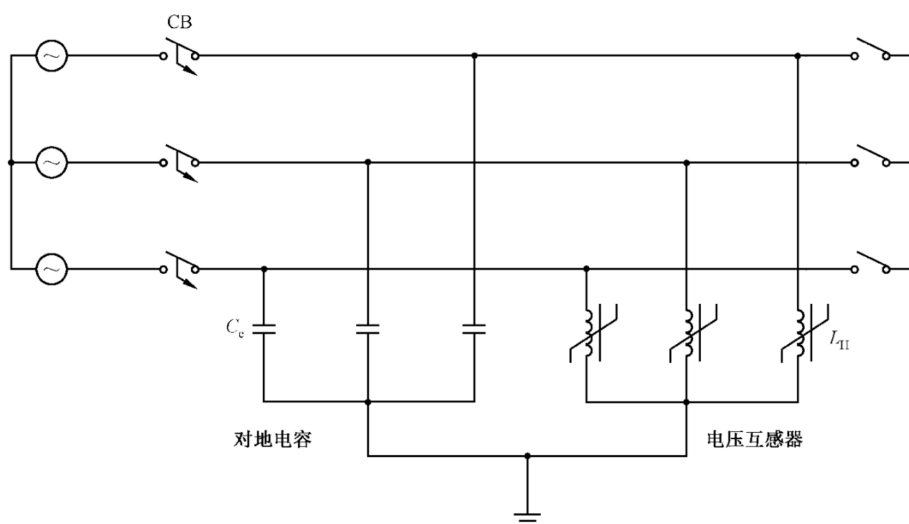
4.4 三相铁磁谐振

4.4.1 概述

在中性点不接地变电站或局部电网中,如果各相装有单相电压互感器,则可能发生三相铁磁谐振,且所有三相均参与铁磁谐振。

4.4.2 系统接线

图 7 给出了一个容易发生铁磁谐振的中性点不接地网络,变压器低压侧中性点不接地,低压侧导线和地之间安装有电压互感器,自变压器高压侧供电。



注：摘自参考文献[8],经 ewz/CH 许可。

图 7 易于发生三相铁磁谐振的中性点不接地系统示意图

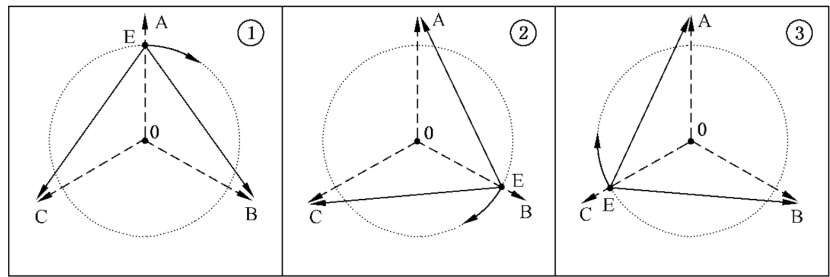
当某一相电压互感器饱和时,中性点电位漂移,将在其他相产生过电压,导致振荡发生,使得三相电压互感器交替饱和。

这种中性点电位漂移也可以由于接地故障的消失而产生。

4.4.3 谐振产生

从系统电源侧看,饱和后的一相电压互感器,与其他两相电压互感器对地电容串联,形成了谐振回路,导致对地电容极性发生改变,继而引起另外两相互感器的某一相也饱和。

中性点的位移类似于一个绕线运动(见图 8 中的向量)。



注：摘自参考文献[8]，经 ewz/CH 许可。

图 8 中性点振荡向量图

由于谐振能量在三相之间持续转换，铁磁谐振过程相当复杂。三相铁磁谐振的例子见附录 C 的 C.3。

4.4.4 铁磁谐振振荡波形

单相铁磁谐振中高频或分频谐波很容易从电压波形中识别。三相铁磁谐振可以从开口三角绕组电压波形识别，该电压波形一般由一个接近于工频的基波和一个低次谐波组成，两者频率相差 1 Hz～7 Hz，即拍频。

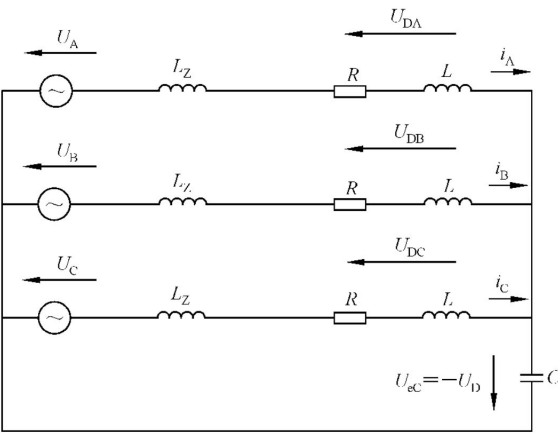
如果系统对地电容较大，以致单个电压互感器饱和生成的电流不足以使对地电容的极性完全反转，则将会发生拍频现象。

Bergmann^[3]在 1966 年论文中阐述了这方面的基础研究成果。理论上，存在多种三相铁磁谐振模式，但现场测试表明，并不是所有的模式都可能实际发生。

Bergmann 在实验室采用如图 9 所示的简化回路，而非图 7 所示的完整回路进行计算。该电路包含：

- 三相电源；
- 三个相同的扼流线圈（替代电压互感器），电阻为 R ，电感为 L ；
- 一个集中参数 C 代表系统对地电容。

Lapierre 对该简化电路进行了数学验证，证明其可行^[11]。

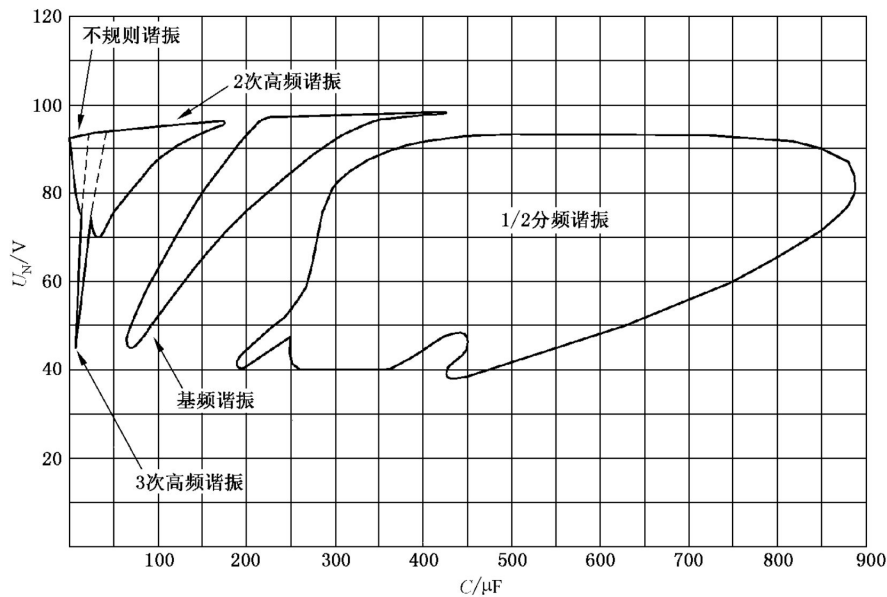


说明：
 $U_A、U_B、U_C$ ——三相电源的相对地电压；
 L_Z ——电源阻抗；
 R ——扼流线圈电阻；
 L ——扼流线圈电感；
 C ——中性点对地电容；
 $U_{DA}、U_{DB}、U_{DC}$ ——施加在扼流线圈上的电压；
 $i_A、i_B、i_C$ ——扼流线圈电流；
 U_{eC} ——中性点对地电容电压；
 U_D ——扼流线圈电压之和， $U_D = U_{DA} + U_{DB} + U_{DC}$ 。

注：摘自参考文献[3]。

图 9 试验系统示意图

研究表明，电容和电压不同，铁磁谐振频率不同，发生二分之一分频谐振的可能性最大(见图 10)。但也测量到基波谐振乃至三次高频谐振。
当电容 C 较小时，会发生混沌铁磁谐振。

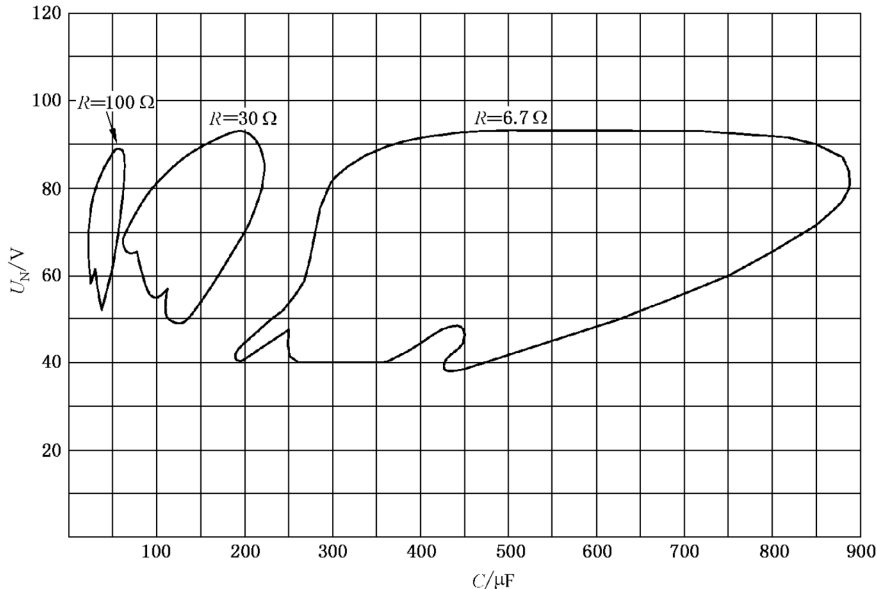


注：摘自参考文献[3]。

图 10 电容与电压坐标下当电阻为 $6.7\ \Omega$ 时试验得到的基频和分频铁磁谐振区域

Bergmann 数学研究表明,理论上二分之一分频以外的谐波也可能出现,但在实验过程中没有出现。

实验表明,如果电阻值增加,二分之一一次分频铁磁谐振只会在中性点对地电容相当低时产生(见图 11)。



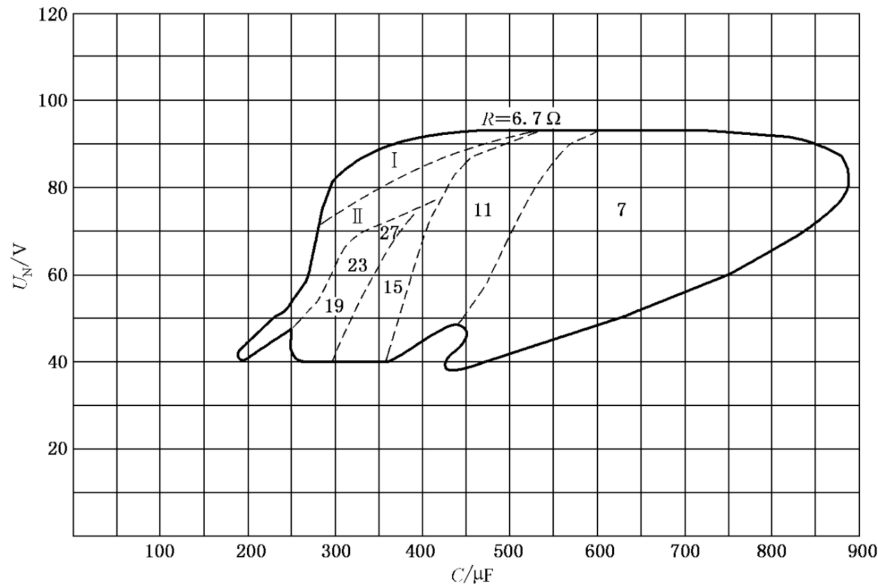
注: 摘自参考文献[3]。

图 11 试验中不同电阻对应的二分之一分频铁磁谐振区域

进一步观察每相的二分之一分频谐波的电压和电流精确信号,可发现明显的不同谐振模式。

在多数情况下,随着三相中扼流线圈的周期性饱和,二分之一分频谐波上会叠加有 7 次~27 次的高频谐波分量,见图 12 中阿拉伯数字标记。

然而,如果电容值小,则其中只有一相或两相饱和,见图 12 中罗马数字标记。



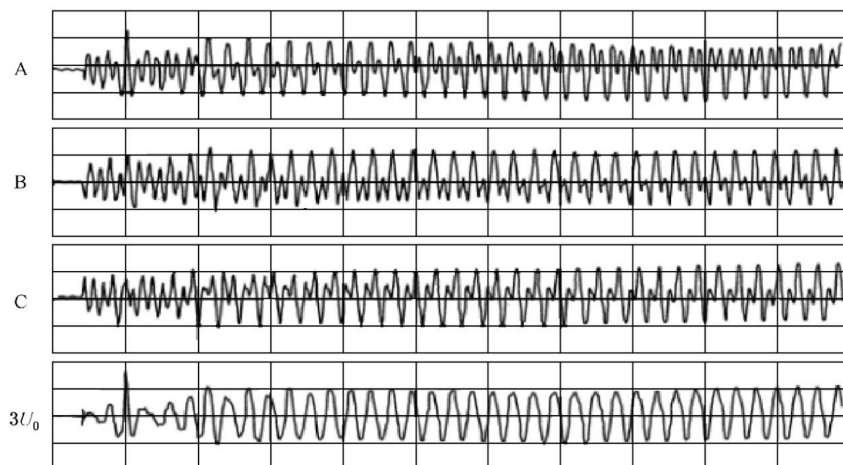
注: 摘自参考文献[3]。

图 12 电容与电压坐标下试验系统中当电阻为 6.7 Ω 时不同模式的二次分频谐振发生区域

变电站内最基本的振荡模式是分频谐振,可以是二分之一次、三分之一次甚至更高次的分频谐振。

4.4.5 典型的三相铁磁谐振波形图

一旦谐振被激发,如果不改变网络结构,则谐振将稳定存在。典型的三相铁磁谐振录波图如图 13 所示。同时所有三相中可观察到电压基波和带拍频铁磁谐振的混合波,在开口三角绕组,可观察到一个清晰的 25 Hz 分频谐波电压和一个非常小的附加分频谐波(拍频)。



注: 摘自参考文献[13],经 Ritz Instrument Transformers/D 许可。

图 13 三相铁磁谐振故障录波

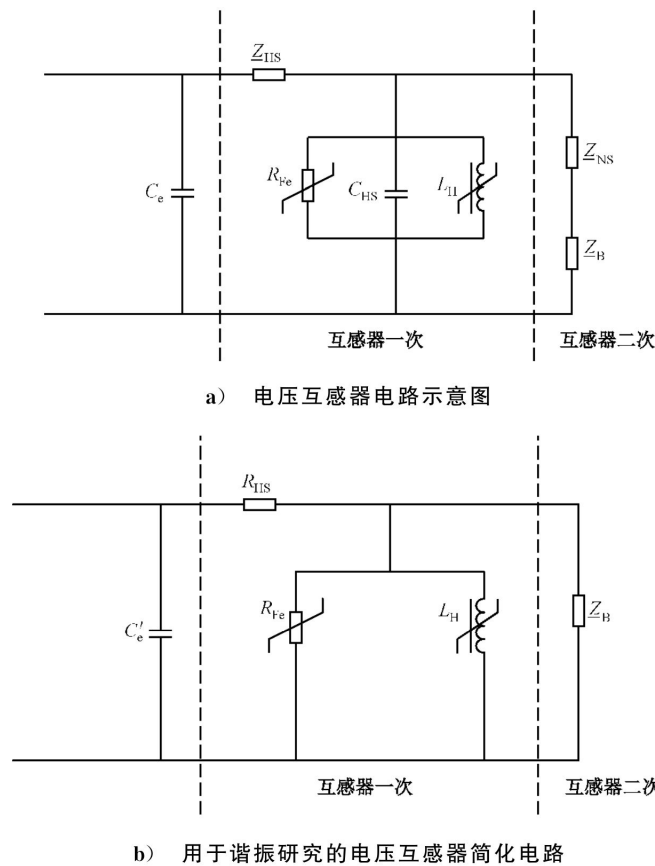
图 13 中展示了三相和中性点电压波形。铁磁谐振频率并不是标准的二分之一分频,即 25 Hz(电源频率 50 Hz)。因此铁磁谐振电压峰值缓慢地在相间转移。本次谐振是变压器合闸时激发的。

5 铁磁谐振实例

铁磁谐振的例子参见附录 C。

6 电磁式电压互感器(关键部件)

电磁式电压互感器的一般原理图见图 14a)。图 14b)为简化模型,可以用来研究铁磁谐振。铁芯的磁化特性决定了非线性电感 L_H 和铁损的非线性电阻 R_{Fe} 。



说明：

C_e —— 对地电容；

C_{HS} —— 电压互感器高压绕组电容；

C'_e —— 总电容 $C'_e = C_e + C_{HS}$ ；

R_{Fe} —— 互感器铁损非线性电阻；

R_{HS} —— 高压绕组电阻；

L_H —— 互感器高压绕组非线性电感；

Z_B —— 二次绕组的负载阻抗；

Z_{HS} —— 高压绕组阻抗；

Z_{NS} —— 二次绕组的漏抗。

图 14 电压互感器电路示意图及简化的铁磁谐振分析图

电压互感器二次绕组上连接的计量和保护继电器的负载 Z_B 带来附加损耗。现代的电子式表计和保护设备接近于零负载,可被忽略。这些附加损耗与网络中其他损耗决定谐振是暂时的或是过渡到稳态。

阻抗 Z_{HS} 包括了一次绕组的漏电感 L_{HS} 和电阻 R_{HS} 。一次绕组的漏感抗和二次绕组的阻抗 Z_{NS} 可以忽略。高压一次绕组的电容可以并入系统的相对地电容。

在正常稳态运行条件下所施加的电压和由此产生的铁芯的磁通密度是恒定的。

相应的励磁电流,根据磁路结构,如是否有气隙,可以到 mA 级(见第 11 章)。

电网中的暂态过程(例如由断路器操作引起的暂态)会导致电压互感器饱和进而激发铁磁谐振。饱和效应使得电压互感器电抗变小,励磁电流增大。

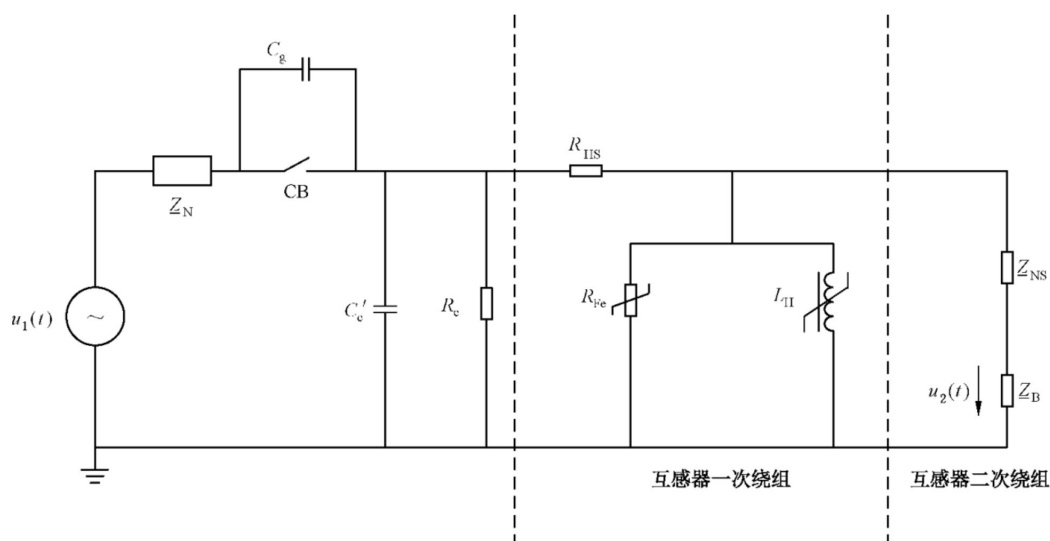
7 单相铁磁谐振电路

7.1 铁磁谐振仿真电路

图 15 是单相铁磁谐振的仿真电路,其简化电路如图 2 所示的常见的串联谐振电路,用来定性分析、理解铁磁谐振现象。不考虑损耗的简化电路不能用于该非线性系统的模拟仿真和数学处理。

对非线性元件的处理和操作前初始条件的正确转化是尤为重要的。依目前计算的能力,没有必要简化电路。

对仿真和计算来说,除了选择正确的原理图,选择正确的初始条件并正确地表征电路元件也很重要。非线性元件,即电压互感器的磁化曲线和回路损耗也在铁磁谐振的仿真中具有重要意义。



说明:

CB —— 断路器;

C_e' —— 总对地电容;

C_g —— 断路器 CB 断口电容;

R_e —— 相对地总绝缘电阻(互感器内部对地绝缘电阻,非线性泄漏电阻,如:由表面泄漏电流、电晕电流以及避雷器泄漏电流引起);

R_{Fe} —— 铁损非线性电阻;

L_H —— 非线性主电感;

$u_1(t)$ —— 一次相对地电压;

$u_2(t)$ —— 二次电压;

Z_B —— 二次 1 号绕组的负载阻抗(负载电阻和电感);

R_{HS} —— 一次线圈电阻;

Z_N —— 网络阻抗;

Z_{NS} —— 二次绕组阻抗(电阻及漏电感)。

注:摘自参考文献[13]。

图 15 单相铁磁谐振仿真电路图

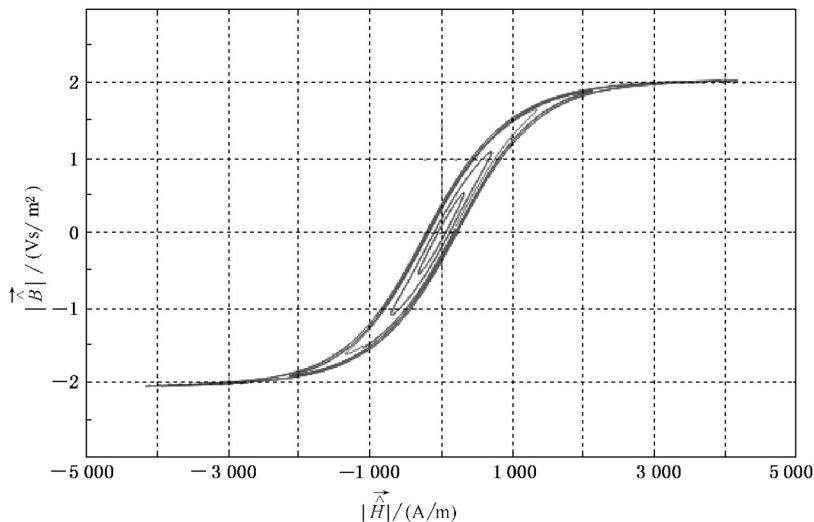
7.2 磁化特性

图 16 显示了一个电磁式电压互感器典型的磁滞曲线。仿真结果表明,即使是电路参数或磁化特性

的小的变化也可以导致完全不同的结果。因此,应尽可能使用真实直至饱和的磁化曲线。

从材料特性计算的磁化特性曲线经常明显偏离实际测量所得曲线。应采用合适的测量方法来测量磁化特性曲线。

在进行测量时,杂散电容的影响也应仔细考虑。因为我们只关注主电感励磁特性,但电容效应会影响测量结果。对已经装配完整的电压互感器进行测量时,杂散电容会有影响。建议只测量铁芯的磁化特性,以避免这种影响。



注: 摘自参考文献[13],经 Trench Germany 许可。

图 16 电压互感器 50 Hz 下的磁滞曲线

此外,需确保饱和特性中的 $\vec{H}(t)$ 足够大。用于模拟的磁化特性曲线是磁通密度 $\vec{B}(t)$ 与磁场强度 $\vec{H}(t)$ 的函数关系。

7.3 回路损耗

另外一个影响分析和仿真结果精度的重要因素是铁磁谐振回路中的损耗,损耗决定振荡能否达到稳态。图 15 中的回路包含了各种等值的损耗元件。

电磁式电压互感器自身的损耗包括高压绕组阻抗 Z_{HS} 损耗、非线性电阻 R_{Fe} 损耗(代表铁芯的磁滞损耗)和负载阻抗 Z_B 损耗。

开关设备的损耗,如绝缘子泄漏电流、氧化锌避雷器的泄漏电流、电晕损耗等,包含在电阻 R_e 中,并与对地电容 C_e 并联。电磁式电压互感器的损耗可以通过产品性能规格等信息获得。对于其他损耗,各个变电站是不同的,受到天气、污秽程度等影响,通常未知。

随着设备的类型和设计的不同,电阻 R_e 可以相差几个数量级。420 kV 敞开式变电站的典型 R_e 值从几兆欧到几吉欧范围。和敞开式变电站相比,GIS 的损耗明显小得多。

8 铁磁谐振研究分析的必要信息

8.1 概述

在进行铁磁谐振网络分析之前,应将网络结构转化为可供仿真分析用的电路模型。如果通过高压实验验证铁磁谐振,则实验回路应包括电压互感器、断路器、所有的电容和电阻元件。如果通过计算机

仿真验证铁磁谐振,则应知道所有相关元件的参数。

仿真结果很大程度上取决于输入参数的给定值。

8.2 单相铁磁谐振

单相铁磁谐振仿真建模所需参数参见表 2^[10]。

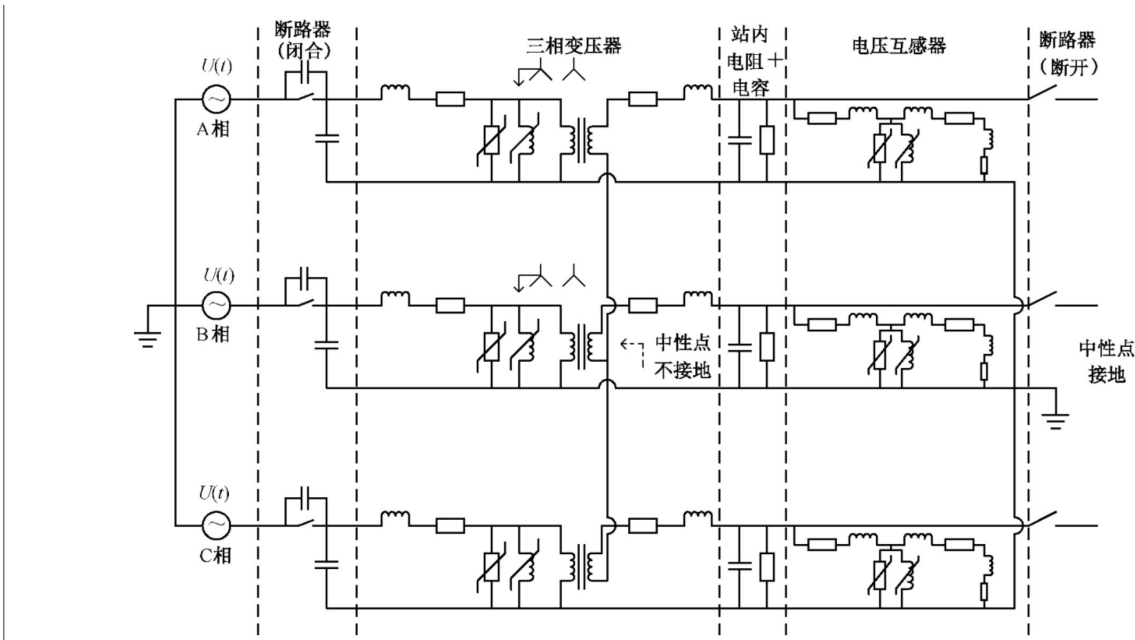
表 2 参数

参数	元件	获得渠道	备注
最大系统电压	网络	运行部门	
中性点接地方式 ^a	网络	运行部门	参考所研究网络结构
各相断路器断口电容	断路器	断路器制造厂商	例如两断口电容 700 pF 串联后为 350 pF
相关断路器数量	网络	设备制造厂商或运行部门	连接到电压互感器的断路器
相间耦合电容	网络	设备制造厂商或运行部门	更准确的模拟需要相间耦合电容
邻近线路的耦合电容	网络	设备制造厂商或运行部门	在研究非带电线路时需要
等效相对地电容 C_e	网络	设备制造厂商和运行部门	电流互感器、电压互感器、母线、线路
相对地总绝缘电阻 R_e (如果可得到)	网络	设备制造厂商和运行部门	通常是未知的参数
电压互感器规格	电压互感器	设备制造厂商或运行部门	二次负荷和准确度要求
实际负荷	电压互感器	设备制造厂商或运行部门	例如数字式二次设备负荷为 0 VA
励磁曲线	电压互感器	互感器制造厂商	
铁损	电压互感器	互感器制造厂商	
一次绕组阻抗	电压互感器	互感器制造厂商	
阻尼设备	电压互感器	互感器制造厂商和运行部门	阻尼设备的类型和参数
开关操作程序和设置	运行状态	设备制造厂商和运行部门	
^a 直接接地、不接地或者谐振接地、高阻抗接地。			

在例行操作、试运行、试验和检修中,可以获取到所有相关的网络结构和开关状态的参数。

8.3 三相铁磁谐振

三相铁磁谐振回路见图 17。



注：摘自参考文献[14]，经 Siemens Switzerland 许可。

图 17 三相铁磁谐振示意图

在本例中，变压器是由三台单相变压器实现的。

与单相铁磁谐振不同，三相仿真不仅需要所有的单相参数，还需要三相耦合电感及耦合电容参数，例如通过变压器的耦合和通过耦合电容的耦合。此外，主变类型和参数数据是必需的。

9 铁磁谐振的计算机仿真

9.1 概述

如同所有的非线性物理问题一样，铁磁谐振没有广义自洽的解析数学表达。因此，需要采用数值计算方法。除通过仿真计算获得铁磁谐振的时域离散表达之外，还可通过非时域的其他方法来确定各种铁磁谐振模式存在的区域。后者的缺点是缺乏实用性，无法给出所需的电压电流波形及其幅值信息。仿真计算能够提供这方面的信息，但是仿真计算仅适用于给定的电路模型，而无法提供通用解。不同的电路结构需要进行重新计算。电路基本参数及其重要性将在 9.2~9.5 中通过单相铁磁谐振仿真模型结果来说明。

9.2 电路及元件

单相铁磁谐振计算电路如图 15 所示。根据戴维南定理简化后的串联谐振电路参见图 2，该图有助于定性理解铁磁谐振现象，但非线性元件和暂态铁磁谐振仿真无法通过此简化电路实现^[10]。除选择合适的电路模型之外，开关动作前的初始条件的设定和电路中各元件的特性表达对仿真结果至关重要。电路中非线性元件的表达对仿真计算有较大影响，例如电压互感器的磁化曲线和回路损耗。

实际中观测到的铁磁谐振的主要频率为系统的基频，如 50 Hz 或 60 Hz，但也有高频谐振分量存在，实际铁磁谐振过电压中的高频谐振分量以 3 倍、5 倍、7 倍基频频率为主，其主要分量最高频率一般不超过 1 kHz，所以所有的电路参数如电容、电感、电阻都可以用集中参数来表示。

所有与单相铁磁谐振仿真相关的电路元件见图 15。

进行详细仿真时，应计入邻相或相邻电压系统的容性耦合。图 6b) 仅示范性地显示了单相耦合。

多相之间的电容耦合应使用电容矩阵。

9.3 回路损耗

相关回路损耗的详细介绍见 7.3。

另外还有一类损耗是电压互感器二次绕组负荷。该负荷包含了该二次回路连接的所有设备,如保护装置、测量仪表以及阻尼器(如果存在的话)。由于现代电子式继电器功耗很低,因此,该功率损耗可以忽略不计。

9.4 单相铁磁谐振仿真示例

9.4.1 概述

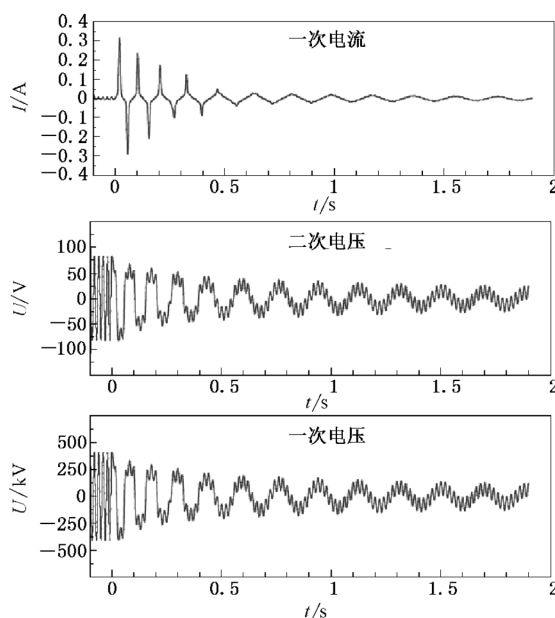
根据不同的电路参数,铁磁谐振基本上可以分出如下四种模式。在示例中,线路间隔在某相最高电压瞬时值 $u_1(t=0)=\hat{U}$ 时被断路器断开:

- 模式 1:非稳态的衰减铁磁谐振;
- 模式 2:稳态基频铁磁谐振;
- 模式 3:稳态分频铁磁谐振;
- 模式 4:稳态混沌铁磁谐振。

以上所有稳态铁磁谐振模式(模式 2~模式 4)均会引起电磁式电压互感器一次绕组电流过大,从而导致过热。

9.4.2 模式 1:非稳态的衰减铁磁谐振

由于断路器操作后的网络状况的变化,任何一个开关操作都不可避免地导致一个暂态过程(见图 18)。由此产生的衰减振荡对电压互感器来说威胁并不严重。



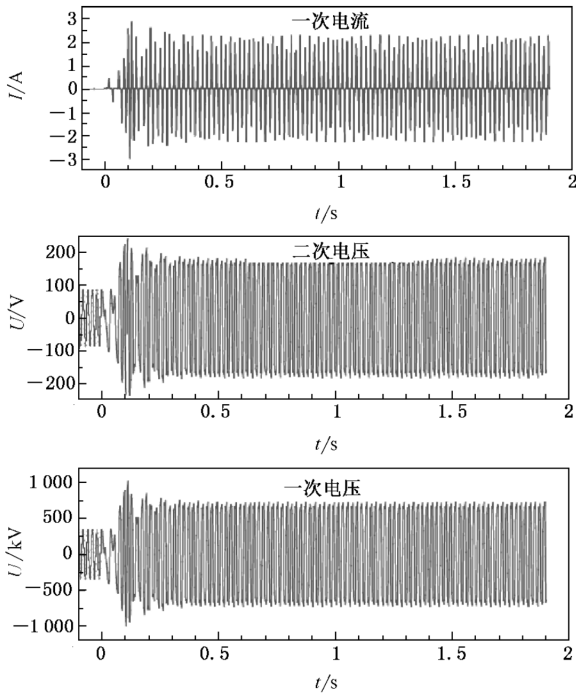
注 1: 频率随饱和度和降低而衰减。

注 2: 摘自参考文献[13],经 Trench Germany 许可。

图 18 五分之一分频(10 Hz)衰减铁磁谐振波形

9.4.3 模式 2: 稳态基频铁磁谐振

在稳态基频铁磁谐振模式下,回路损耗不足以抑制振荡(见图 19)。随着电路中电容值的不同,可能产生较高的基频谐振过电压,设备的击穿或电磁式电压互感器一次绕组电流过大而导致过热。

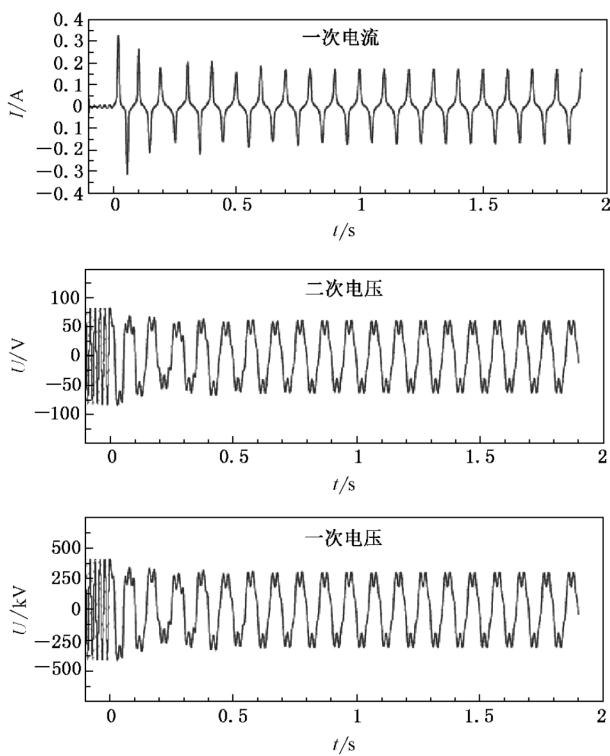


注: 摘自参考文献[13], 经 Trench Germany 许可。

图 19 基频稳态铁磁谐振

9.4.4 模式 3: 稳态分频铁磁谐振

最常见的铁磁谐振模式是分频谐振,而且只有奇次分频谐振(见 D.4)。由于谐振频率低,因此分频铁磁谐振电压低于基频铁磁谐振。频率越低,铁芯饱和电压越低。流过一次绕组的电流较大,从而导致过热。五分之一次分频 10 Hz 的铁磁谐振的例子见图 20。

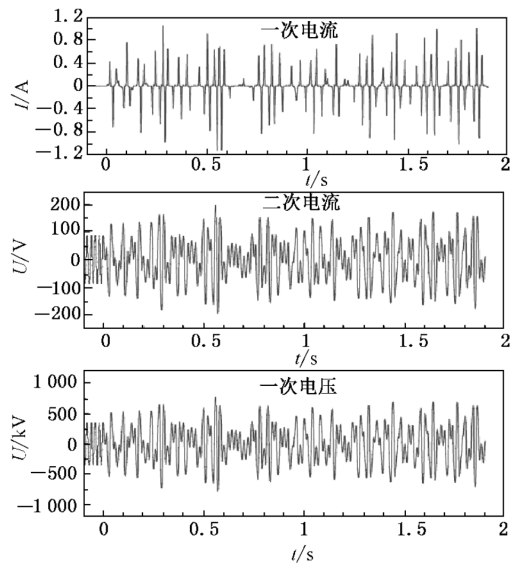


注：摘自参考文献[13],经 Trench Germany 许可。

图 20 10 Hz 稳态铁磁谐振

9.4.5 模式 4: 稳态混沌铁磁谐振

极少的情况下,可产生无确定频率的混沌铁磁谐振,见图 21。此时,谐振电压远高于分频谐振,一次绕组电流过大导致过热。



注：摘自参考文献[13],经 Trench Germany 许可。

图 21 稳态混频铁磁谐振

9.5 三相铁磁谐振仿真电路

对于三相铁磁谐振,三相之间的耦合是重要的影响因素。然而,不同相之间的相互耦合很大程度上是未知的,需要深入研究来确定。此外,如图 17 所示,主变也应在模拟中考虑,包括磁化特性以及对地杂散电容。实际上,这些参数不易得到,特别是三相主变。此外,除了电容耦合,磁耦合以及变压器三相之间的磁化特性相互影响也需考虑。

因此,实际上电磁式电压互感器的磁化特性是通过现场测试,或通过测量与仿真相结合的方法来获得。

如果进行仿真,则这些特性被用于分析发生铁磁谐振现象的电网配置,制定限制措施。对此,等效电路的参数采用实验得到的电压和电流信号来表达。然后,利用这些结果改善电网配置,例如:改变电压互感器的设计,以抑制铁磁谐振。

10 实验研究、方法和实际测量

10.1 概述

在有电磁式电压互感器的系统中,可以通过测量电气信号,来确定在断路器操作后是否发生铁磁谐振。通常而言,核心问题是该振荡是否会导致互感器一次绕组通过有威胁的大电流。通常为了验证计算模型,同步测量多个电压和电流信号,然后与理论计算波形进行比较^[15]。

由于高电压变电站中绝缘表面的泄漏电流可明显抑制或防止铁磁谐振,敞开式变电站的试验研究应在干燥的天气条件下进行。

不论是单相或三相谐振,测量应在所有三相同时进行。

10.2 单相铁磁谐振

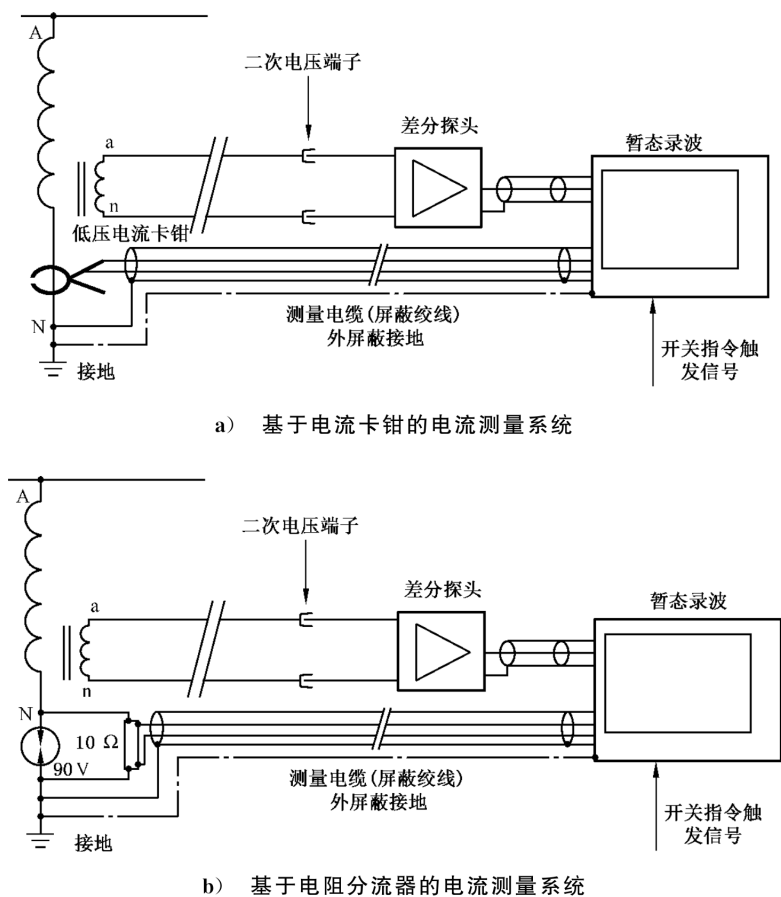
为了研究铁磁谐振在某一电网配置中是否发生,通常在开关操作过程中进行测量。电磁式电压互感器一次绕组电流是检测铁磁谐振的最敏感的变量。在正常运行时约几毫安。为了测量这一电流,下面两种方法可供选择:

- a) 电流卡钳安装在高压绕组的接地端引线处[见图 22a)]。应标定电流卡钳从 0 Hz~10 kHz 频率范围内的传输特性。
- b) 将分流器接入高压绕组接地端子 N 与接地点之间,分流器典型电阻为 10 Ω 。测量电缆应为屏蔽绞线[见图 22b)]。

在操作过程中一次绕组的接地不应断开,否则端子 N 上会有高电压。同样的原因,电阻应按照一次绕组可能通过的最大电流考虑。作为一种安全措施,过电压保护元件安装在一次绕组的接地端子 N 与接地点之间。

在铁磁谐振的情况下,通过一次绕组的电流峰值在 20 mA 至几百毫安之间。只有在极端的情况下,才会达到 1 A 的数量级。

电压互感器一次绕组的电流会清晰地指示是否存在铁磁谐振。

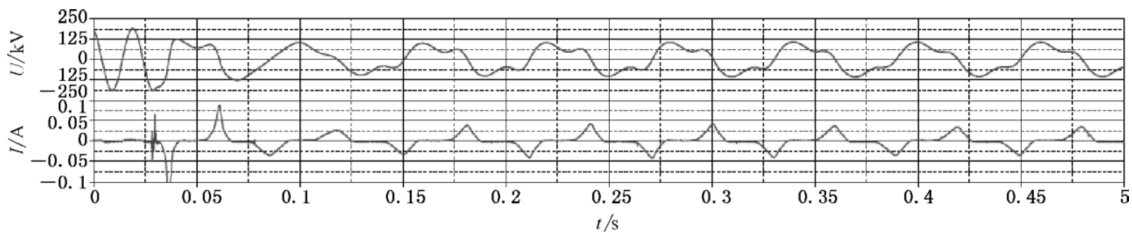


注：摘自参考文献[13]，经 FKH Zürich/CH 许可。

图 22 电压互感器一次绕组电流测量系统及二次绕组电压测量系统

如果对铁磁谐振进行详细实验分析，例如用于计算机仿真验证，则多通道测量是有必要的（包括电源电压、电磁式电压互感器的二次电压及可能存在的阻尼装置电流和其他信号）。

如果仅测量电压（见图 23，上部波形曲线），通常不可能清晰地区分振荡中铁芯是否饱和，流过一次绕组的电流是否过高造成危害。饱和的程度可以从窄脉宽电流峰值振幅识别（见图 23，下波形曲线）。



说明：

上波形曲线：电压互感器二次绕组测量到的一次绕组上的电压；

下波形曲线：电压互感器一次绕组电流。

注：摘自参考文献[13]，经 GM Mettlen 许可。

图 23 220 kV 系统三分之一谐波（50/3 Hz）稳态单相谐振波形例子

在上面的例子(见图 23)中,断路器在电压峰值时操作,这是最坏的情况。电压波形呈现为三分之一分频。通过一次绕组的电流(正常运行在 1 mA 数量级),在谐振开始时超过 100 mA,稳态时峰值达到 50 mA。电流电压曲线显示电磁式电压互感器发生了稳态铁磁谐振。在铁磁谐振中一次绕组由于通过很大电流可能会过热。

10.3 三相铁磁谐振

三相铁磁谐振的测量一般来说是非常复杂的,通常在变电站中的实际馈线间隔上进行测试,不适合在设备制造商或在其他实验室进行。

为了判断某一操作中是否有发生三相铁磁谐振的危险,测量馈线间隔中三相电压互感器一次绕组的电流和电压是非常关键的。

测量设备与图 22 中单相铁磁谐振测量设备相同。

此外,中性点不接地系统中(电压互感器)二次开口三角电压也应进行测量,以获得所产生的非星形接地点的电压。

在现场试验中,操作变压器高压侧的断路器可能激发三相铁磁谐振。每次断路器操作都对变压器产生很大冲击,尤其在分接抽头处于较高的挡位时。

为了防止变压器受损,铁磁谐振还可以通过将馈线间隔中电压互感器二次侧瞬时短路(约 200 ms)来激发,见图 24。

这种瞬时短路是最严重的激发方式。通过这种方法测试电压互感器的铁磁谐振特性,可以避免在高压侧频繁开断而导致变压器和断路器遭受冲击。

该测试方法经实际验证是有效的。

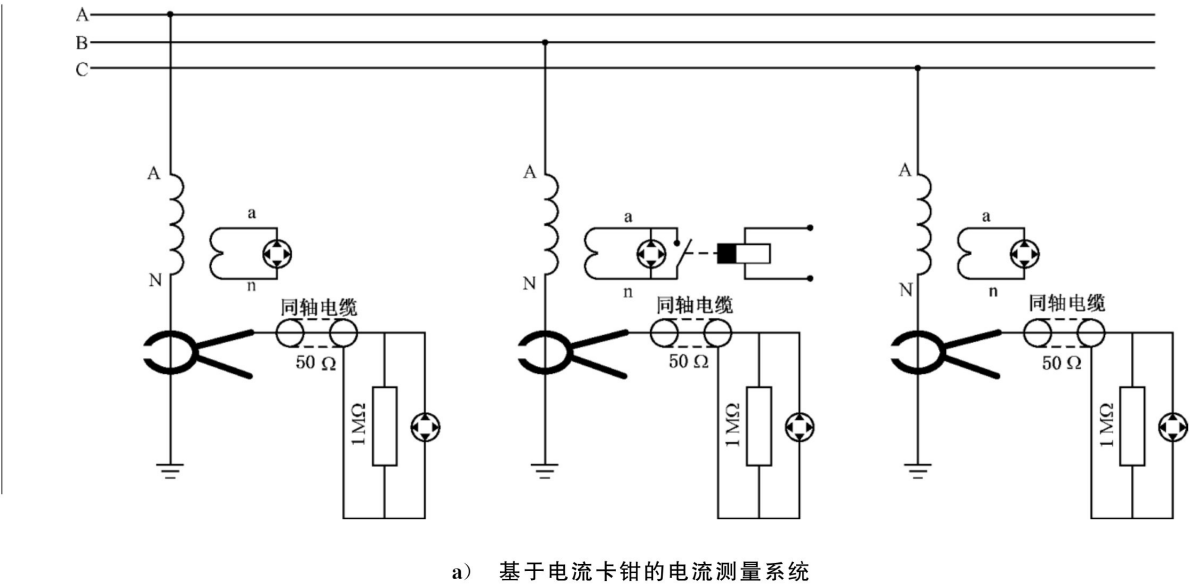
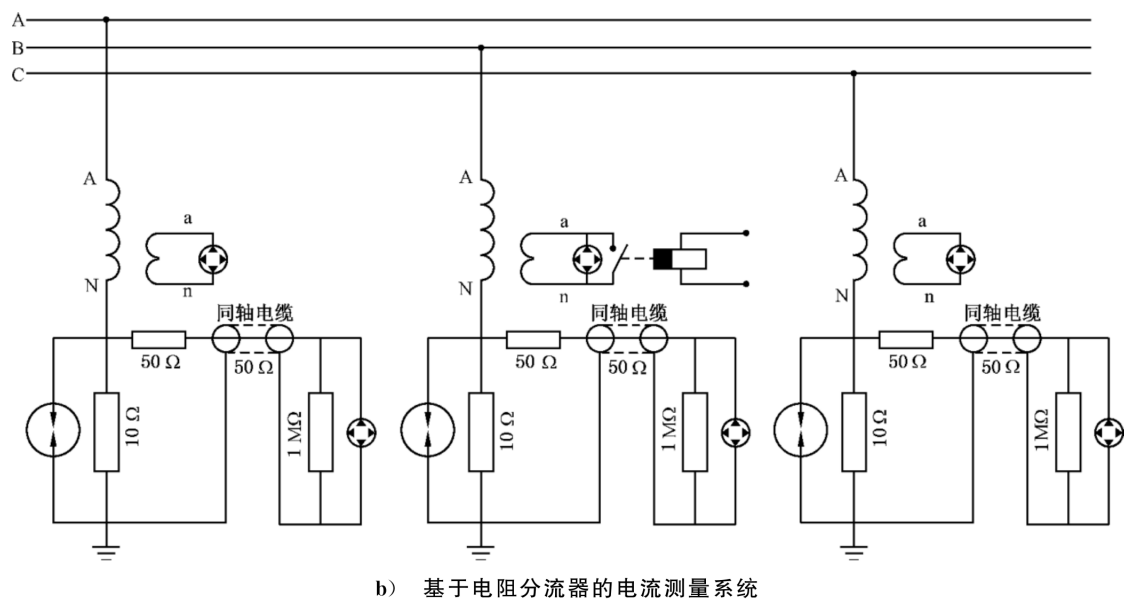


图 24 示波器测量三相铁磁谐振



b) 基于电阻分流器的电流测量系统

在电压互感器二次绕组附加小电路激发铁磁谐振。

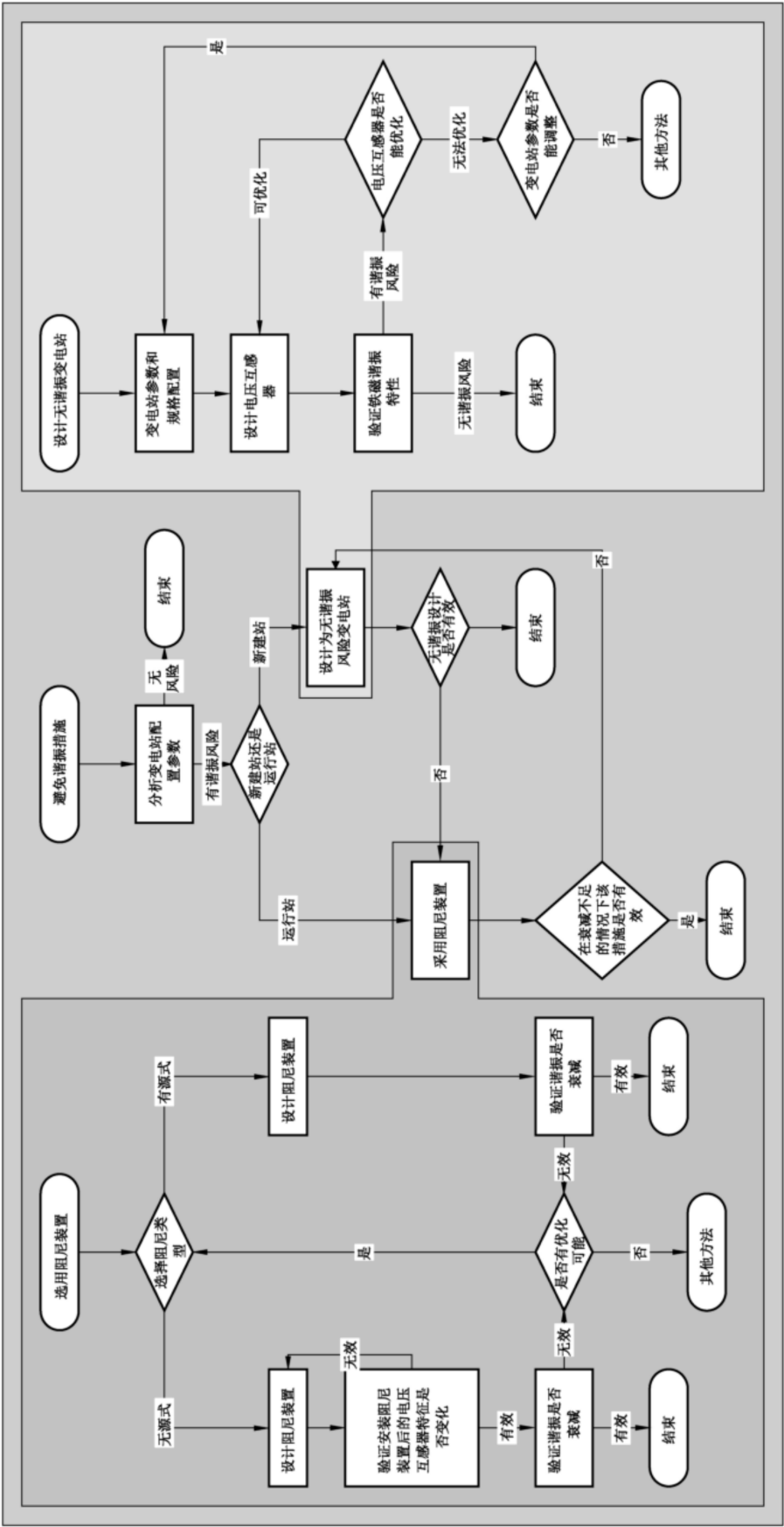
注：摘自参考文献[13]。

图 24 (续)

11 铁磁谐振的防止和抑制

11.1 抑制措施流程图

图 25 给出了一个如何分析、防止铁磁谐振的流程图。首先是从设备原理角度评估发生单相或三相铁磁谐振的风险。识别可能的危险操作状态,给出进一步的预防措施。重要的是区分运行站(中间的主流程图的左分支)和新建站(右分支)。



注：摘自参考文献[16]。

图 25 铁磁谐振分析及防止方法流程图

11.2 运行变电站

运行变电站难以改造,只能通过加装外部阻尼装置或采取适当的操作方式来防止铁磁谐振的发生。如果使用阻尼装置不成功,则可判断是否可以通过避开某些危险的运行方式和操作方式来防止稳态铁磁谐振,如:立即操作隔离开关切断能量耦合。如果这些措施还不成功,则变电站的系统结构(设备参数)将不得不相应改变(如:降低断路器的断口电容)。

11.3 新建工程

新建变电站与变电站扩建或改建工程一样,在设计阶段就可以评估铁磁谐振发生的可能性。目前,必要的(铁芯)气隙或阻尼装置的可靠性计算只能在单相进行。然而在任意情况下,可以在受影响的变电站和典型的参考变电站进行试验评估。

如果计算方法表明(变电站)易于发生单相铁磁谐振,就要采取预防措施。如:改变电磁式电压互感器设计(如:采用更低磁通密度),或改变断路器的断口电容。

如果上述措施不可行,则可以在电压互感器的一次侧中性点增加消谐装置或采用 4PT 接线方法,或在二次绕组连接无源的或有源的阻尼装置来防止稳态铁磁谐振。

11.4 防止铁磁谐振

11.4.1 概述

对变电站来说,防止稳态铁磁谐振是非常重要的,可以避免巨大的损失。可能产生铁磁谐振的操作状态应该尽可能避免。

可采取的方法如下:

- a) 在现有的变电站,尽可能采用主动或被动式阻尼装置来避免铁磁谐振;
- b) 对新的电压互感器改进设计,如:改变感抗、铁芯采用气隙或开口等方案。

注:带空气隙的电压互感器,在网络频率 $f_R = 50\text{ Hz}/60\text{ Hz}$ 下具有线性阻抗(ωL_H)。由断路器断口电容、变电站对地电容 C_0 、电磁式电压互感器一次主电感 L_H 组成的谐振回路很容易发生工频铁磁谐振。同样的结论也适用于开磁路电压互感器。但如果回路中包含具有线性电感的电磁式测量用电压互感器,则难以激发单相的分频铁磁谐振(三分之一分频、五分之一分频)。

单相铁磁谐振和三相铁磁谐振的解决方案见 11.4.2 和 11.4.3。

11.4.2 单相铁磁谐振

防止和抑制稳态单相铁磁谐振的方法如下:

- a) 断开线路隔离开关 S_1 和 S_2 (见图 5),将电磁式电压互感器与停电线路隔离;
- b) 打开母线隔离开关 S_1 (见图 4),断开断路器的能量耦合;
- c) 通过改变谐振回路避免铁磁谐振:在新建变电站建议优化相关的电容(如:限制断路器的断口电容)。

11.4.3 三相铁磁谐振

防止或抑制稳态三相铁磁谐振的方法为:通常能够通过优化操作方式防止铁磁谐振(如:改变变压器分接开关位置,在二次电压最低时进行操作)。

11.5 阻尼铁磁谐振

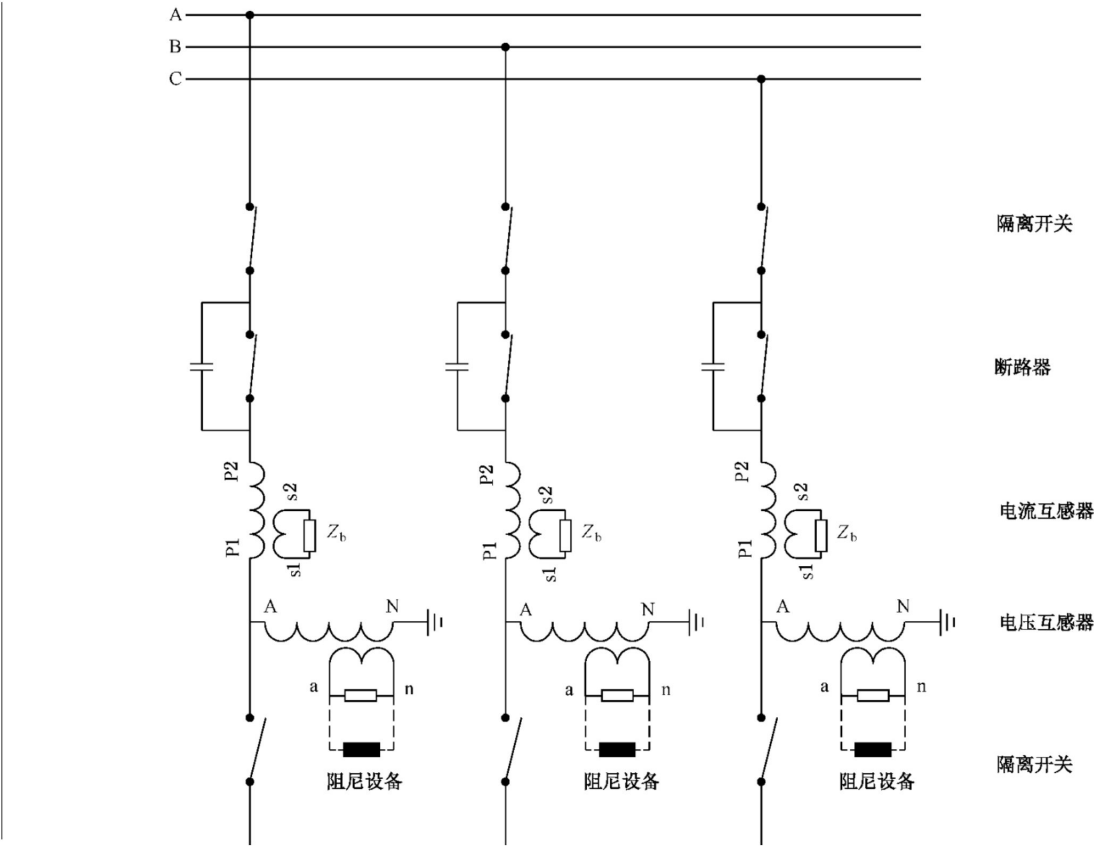
11.5.1 概述

以下的辅助阻尼装置已被成功地应用在高压变电站中。

铁磁谐振一般有两种模式：单相和三相铁磁谐振。应识别出不同的模式，采取不同的方法进行治理。

11.5.2 单相铁磁谐振

为了阻尼单相铁磁谐振，阻尼装置安装在电压互感器每相的二次绕组上(见图 26)。



注：摘自参考文献[16]。

图 26 电压互感器二次绕组加装阻尼设备电路图

阻尼装置可以是：

a) 电阻(线性或非线性)

电阻应能长期运行，另外应承受因阻尼铁磁谐振而产生的短时绝热温升。

b) 饱和线圈

正常运行时，该线圈是低损耗的。铁磁谐振时线圈趋于饱和，产生高损耗来阻尼振荡。线圈工作电压应根据额定电压因数选取。

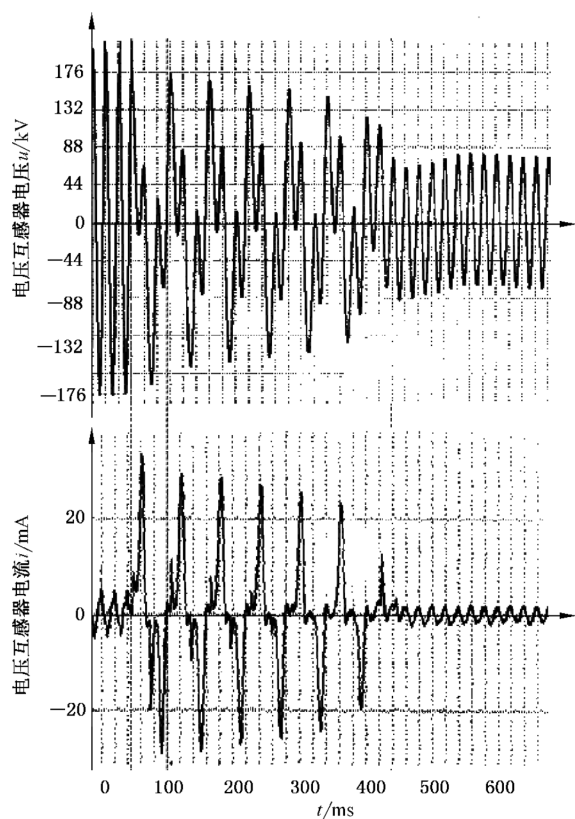
c) 电阻和线圈的组合

正常运行时，该线圈和电阻是低损耗的。铁磁谐振时线圈趋于饱和，和电阻一起呈高损耗来阻尼振荡。电阻限制流过线圈的电流。线圈和串联电阻的工作电压应根据额定电压因数选取。

d) 与电容器组合的线圈(调谐至谐振频率)

线圈和电容器调谐至铁磁谐振的谐振频率(如：三分之一分频 50/3 Hz、五分之一分频 10 Hz、七分之一分频 50/7 Hz)。该电路可以有效地阻尼谐振。每一个频率对应有一个单独的电路。

成功的阻尼单相铁磁谐振的例子见图 27。



注：摘自参考文献[16]。

图 27 三分之一次单相铁磁谐振(50/3 Hz)阻尼例子

建议：
阻尼装置接在二次绕组，产生额外负载，应满足 GB/T 20840.3—2013 中 5.6 中的有关规定。
在电压互感器带额定负荷的情况下，也能起到阻尼作用。
注：如在开口三角连接阻尼装置，倘若三相产生相同的铁磁谐振，则阻尼失败。

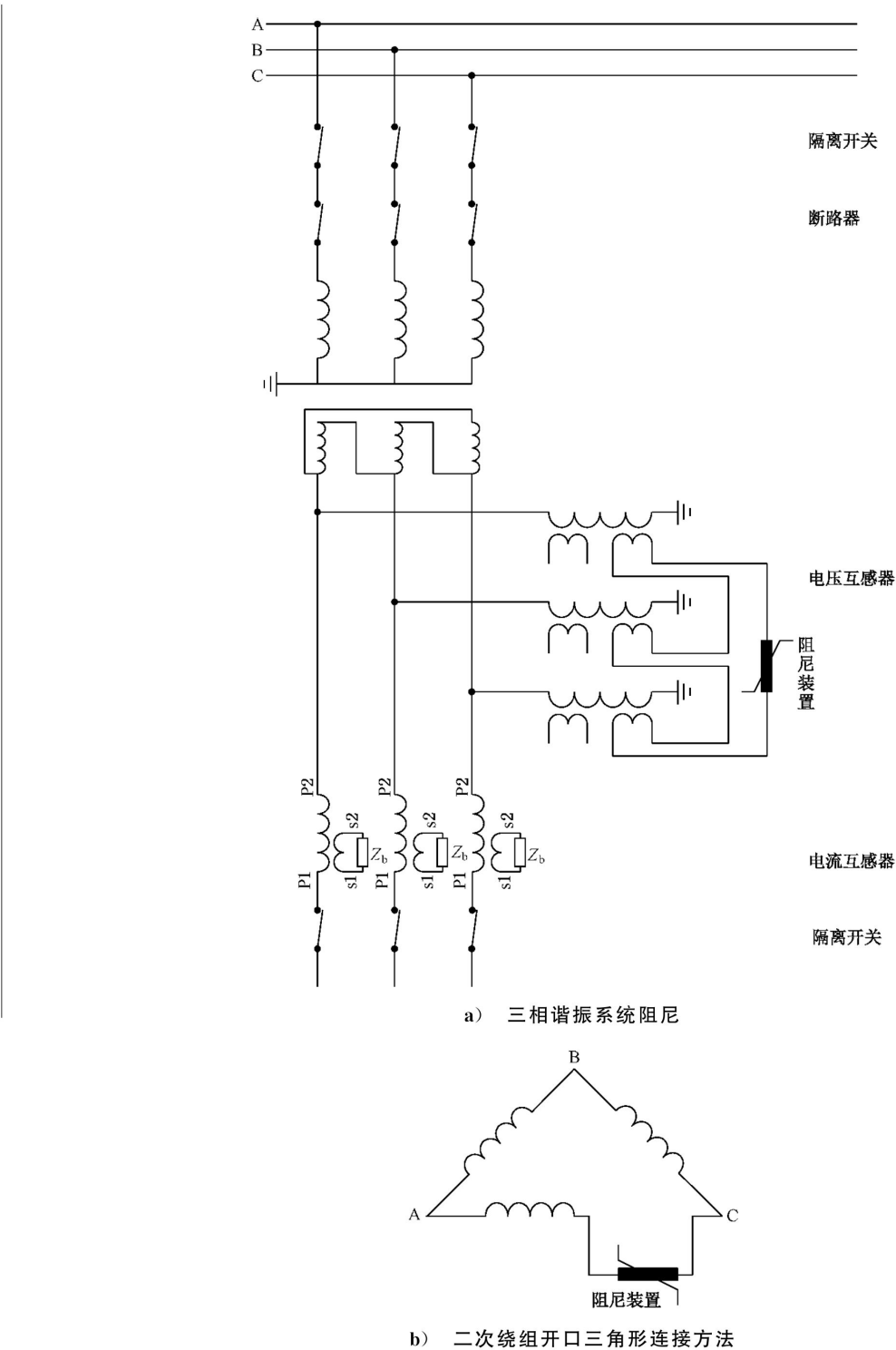
11.5.3 三相铁磁谐振

11.5.3.1 概述

三相铁磁谐振的阻尼可以安装在电压互感器的开口三角(见图 28)或变压器的中性点(见图 29)。
建议：
在这两种情况下，阻尼装置应承受单相接地的电网故障(1.9 U_n , 8 h)。
其在每一个案例中需考虑经济性。

11.5.3.2 电压互感器开口三角绕组的阻尼

一种经常用于阻尼三相铁磁谐振的方法是在电压互感器的开口三角绕组上连接阻尼装置。



注：摘自参考文献[16]。

图 28 出线间隔电压互感器开口三角形阻尼抑制铁磁谐振方法

11.5.3.3 变压器二次侧中性点的阻尼

在电压互感器的二次绕组没有开口三角时,需要采取另一种阻尼措施。
可在电力变压器二次侧的中性点上安装附加电压互感器,连接专门设计的阻尼装置可以抑制铁磁

谐振(见图 29)。

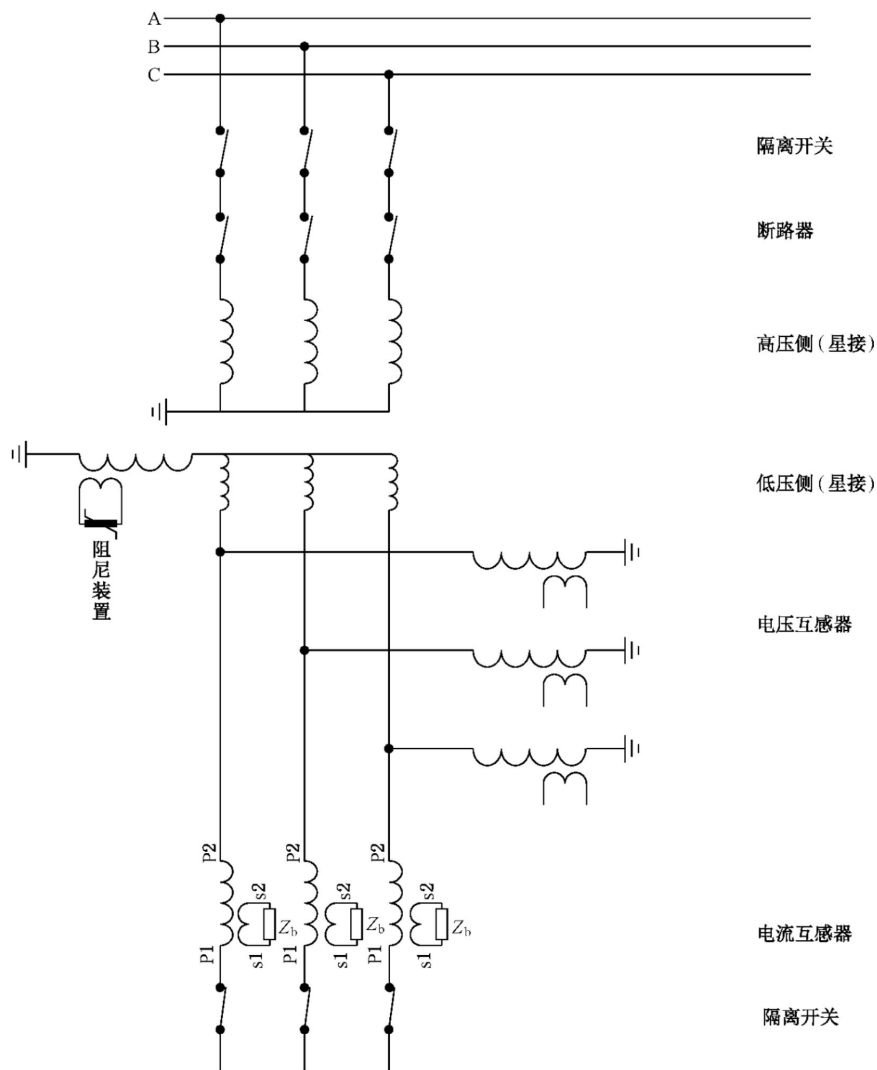


图 29 变压器二次侧中性点加装阻尼装置抑制铁磁谐振阻尼方法

11.5.3.4 互感器一次侧中性点的阻尼

可在电压互感器一次侧的中性点上安装附加电压互感器或阻尼装置抑制铁磁谐振(见图 30),或在电压互感器一次侧的中性点上安装消谐电阻抑制铁磁谐振(见图 31)。

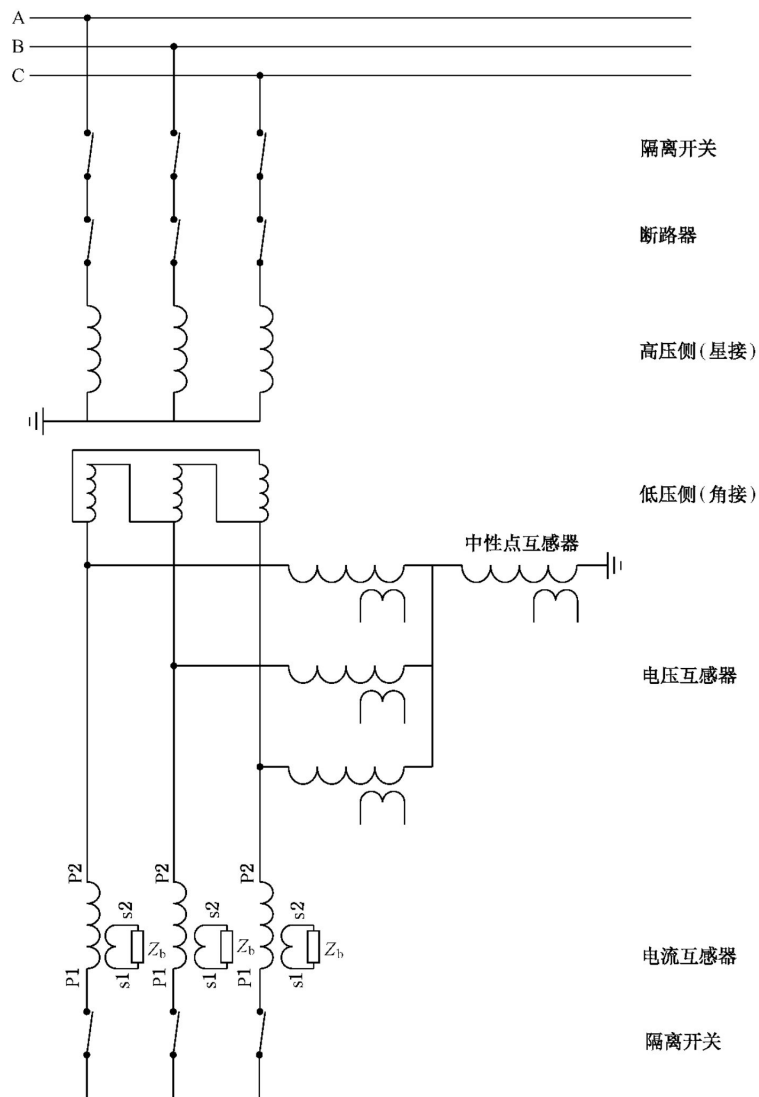


图 30 互感器一次侧中性点加装电压互感器抑制铁磁谐振阻尼方法

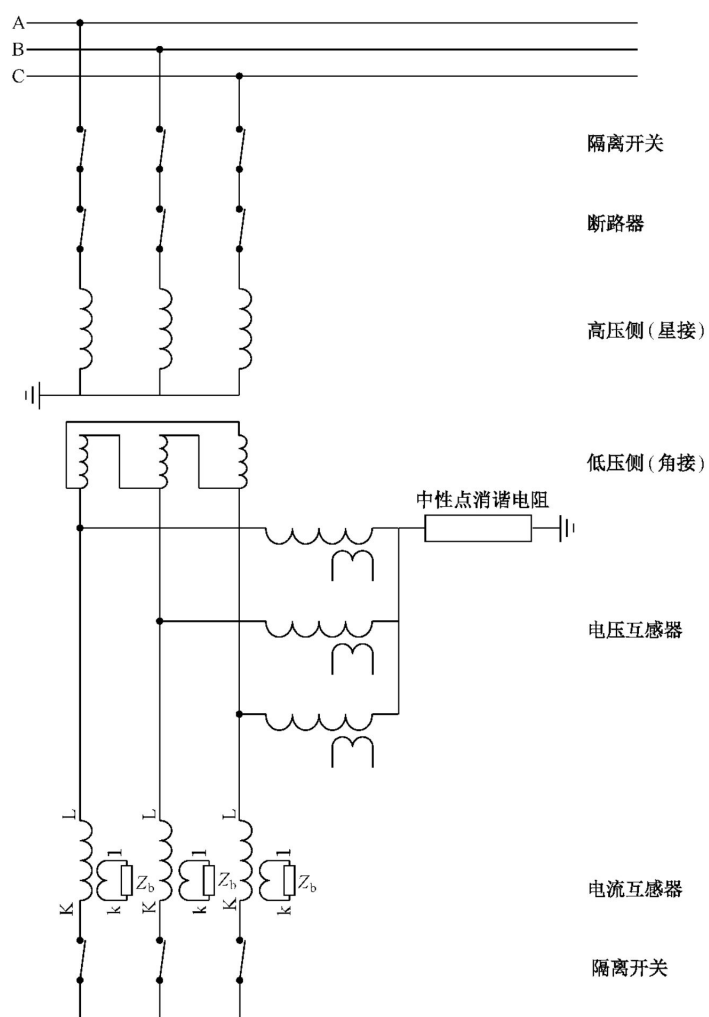


图 31 互感器一次侧中性点加装消谐电阻抑制铁磁谐振阻尼方法

附 录 A
(资料性附录)

本部分与 IEC TR 61869-102:2014 相比的结构变化情况

本部分与 IEC TR 61869-102:2014 相比在结构上有适当调整,具体章条编号对照情况见表 A.1,图编号对照情况见表 A.2。

表 A.1 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 章条编号对照情况

本部分章条编号	对应的 IEC TR 61869-102:2014 章条编号
引言的第一段	3.1 的第一段
11.5.3.4	—
附录 A	—
附录 B	—
附录 C	5
附录 D	附录 A

表 A.2 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的图编号对照情况

本部分图编号	对应的 IEC TR 61869-102:2014 图编号
图 14	图 21
图 15	图 22
图 16	图 23
图 17	图 24
图 18	图 25
图 19	图 26
图 20	图 27
图 21	图 28
图 22	图 30
图 23	图 31
图 24	图 32
图 25	图 33
图 26	图 34
图 27	图 35
图 28	图 36
图 29	图 37
图 30	—
图 31	—
图 C.1	图 14

表 A.2 (续)

本部分图编号	对应的 IEC TR 61869-102:2014 图编号
图 C.2	图 15
图 C.3	图 16
图 C.4	图 17
图 C.5	图 18
图 C.6	图 19
图 C.7	图 20
图 D.1	图 A.1
图 D.2	图 A.2
图 D.3	图 A.3

附 录 B
(资料性附录)

本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的技术性差异及其原因

表 B.1 给出了本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的技术性差异及其原因。

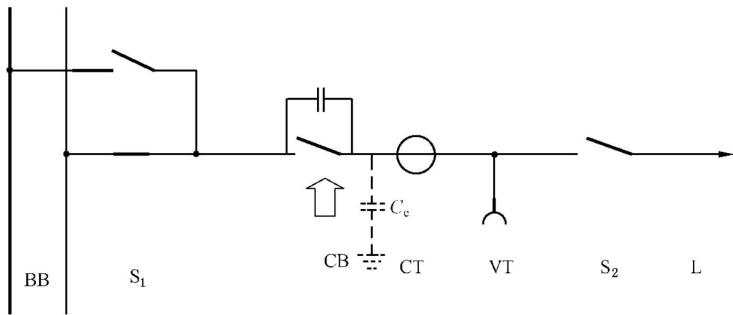
表 B.1 本部分与 IEC TR 61869-102:2014 的技术性差异及其原因

本部分章条编号	技术性差异	原因
2	关于规范性引用文件,本部分做了具有技术性差异的调整,调整的情况集中反映在第2章“规范性引用文件”中,具体调整情况为: ——用修改采用国际标准的 GB/T 20840.3—2013 代替 IEC 61869-3; ——用修改采用国际标准的 GB/T 20840.5 代替 IEC 61869-5	适应我国国情
3.1	增加了“甩负荷及线路故障等情况”	适应我国国情
	图 2 中磁通密度函数的表达由 $ \vec{B}(i) $ 改为 $ \vec{B} (i(t))$	适应我国国情
4.1	删除了图 5 中的绕组端子标志	与标准内容无关
4.4.4	对图 9 中电感的图形进行了修改	适应我国国情
8.3	图 17 中图形符号进行了简化	适应我国国情
9.2	增加了“但也有高频谐振分量存在,实际铁磁谐振过电压中的高频谐振分量以 3 倍、5 倍、7 倍基频频率为主,其主要分量最高频率一般不超过 1 kHz”	适应我国国情
10.2	删除了 IEC TR 61869-102:2014 中“图 29 采用测量电阻通过电压互感器一次线圈端子 N 测量电流信号的连接方式”	适应我国国情
10.3	图 24 中增加了“基于电流卡钳的电流测量系统”示意图,互感器的电感、保护间隙等采用了图 19 的模型表达	适应我国国情
11.3	增加了“在电压互感器的一次侧中性点增加消谐装置或采用 4PT 接线方法”	适应我国国情
11.5.2	图 26 中互感器的电感采用了图 19 的模型表达,删除了“(红色圈内)”字样	适应我国国情
11.5.3.2	图 28 中互感器的电感采用了图 19 的模型表达	适应我国国情
11.5.3.3	图 29 中互感器的电感采用了图 19 的模型表达,并将变压器二次侧改为星型接法	适应我国国情
11.5.3.4	增加了“11.5.3.4 互感器一次侧中性点的阻尼”	适应我国国情
	增加了“图 30 互感器一次侧中性点加装电压互感器抑制铁磁谐振阻尼方法”和“图 31 互感器一次侧中性点加装消谐电阻抑制铁磁谐振阻尼方法”	
C.1	删除了 IEC TR 61869-102:2014 图 14 中的图 a)	适应我国国情

附录 C
(资料性附录)
铁磁谐振实例

C.1 断口电容耦合激发铁磁谐振

断口电容耦合激发铁磁谐振实例为一个经常发生铁磁谐振的敞开式变电站出线间隔,该间隔仅在试验和试运行时会发生单相铁磁谐振,但正常运行时不会发生。受电压互感器励磁特性和此间隔的等效电容(断路器的断口电容和对地电容)影响,如果此出线间隔在线路隔离开关打开时断开断路器,则由于此时该间隔的对地电容很小,有可能发生铁磁谐振(见图 C.1)。这种情况下,运行电压通过断路器的断口电容耦合在电压互感器上。此为一种典型的铁磁谐振回路。

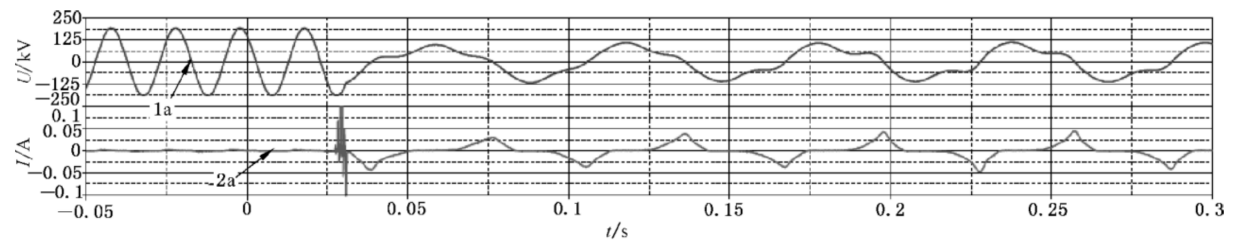


说明：
BB —— 母线；
S₁ —— 母线隔离开关，闭合；
CB —— 断路器，触发条件是开启断路器；
CT —— 电流互感器；
VT —— 电压互感器；
S₂ —— 线路隔离开关，断开；
L —— 出线。
注：摘自参考文献[17]，经 ewz/Ch 许可。

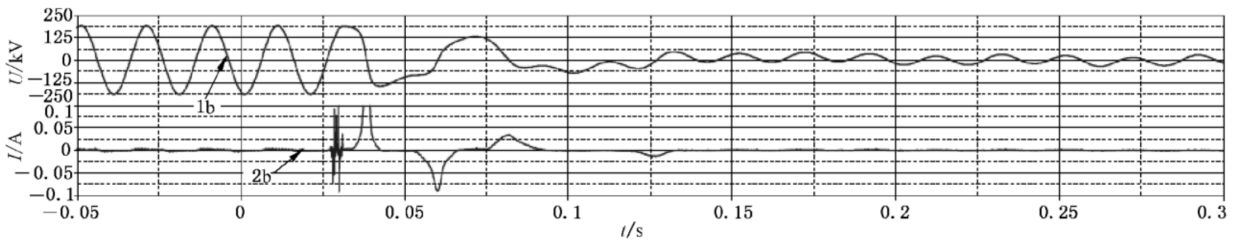
图 C.1 某变电站单相铁磁谐振接线示意图

图 C.2 为实测的断路器断开后某相电磁式电压互感器的一次电流和二次电压。在第一种情况[见图 C.2a)],发生了稳态铁磁谐振。在第二种情况[见图 C.2b)],发生了衰减的铁磁谐振。

是否发生稳态谐振取决于回路参数,包括电压互感器的励磁特性、等效电容等,大多数情况下还取决于合闸相角(参见附录 D)。



a) 稳态铁磁谐振, 频率 50/3 Hz(三分之一分频), 电压峰值处开关动作



b) 非稳态衰减铁磁谐振, 暂态波形(0.03 s~0.15 s); 电压过零点附近开关动作
(0.16 s~0.3 s 耦合电压信号波形可被观察到)

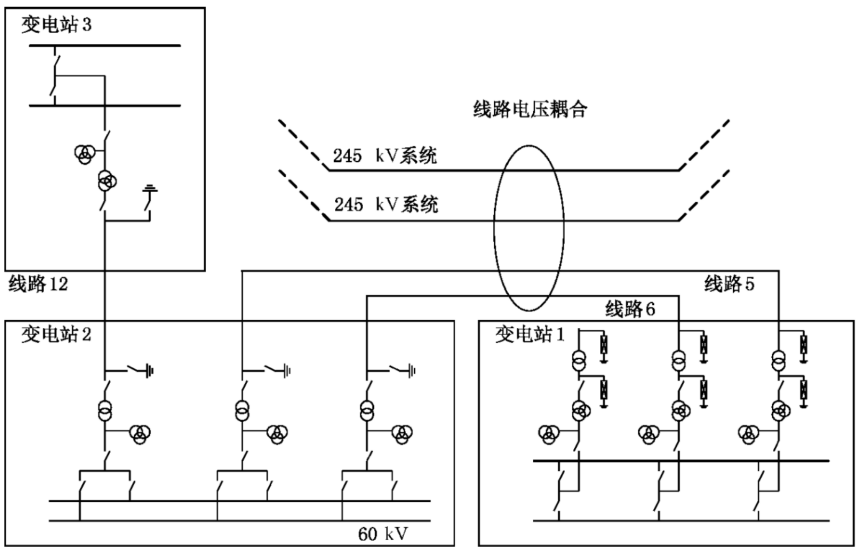
注 1: 上方曲线(1a/1b)展示了电压互感器二次绕组测量到的原电压, 下方曲线(2 a/2 b)展示了电压互感器一次绕组电流。

注 2: 摘自参考文献[17], 经 ewz/Ch 许可。

图 C.2 图 C.1 中所示断路器断开后引起的单相铁磁谐振振荡波形

C.2 平行线路耦合单相铁磁谐振

另一种发生铁磁谐振的情形与平行线路的耦合有关[见图 5 和图 6b)]。在图 C.3~图 C.5 的例子中, 60 kV 两端接有电压互感器, 60 kV 线路不带电, 铁磁谐振因线路耦合而发生。



注: 摘自参考文献[17], 经 ewz/Ch 许可。

图 C.3 单相 60 kV 电压等级三个变电站单相网络示意图

线路 12 因检修而在变电站 2 和变电站 3 断电并接地, 变电站 1 的变压器空载, 因此由于检修工作

变压器间隔停电。

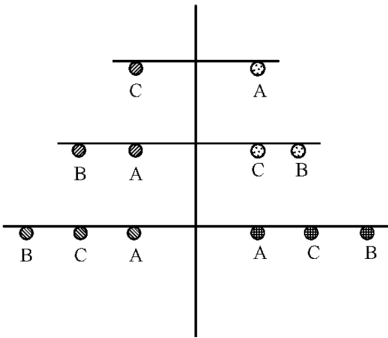
这种情况下,线路 5 断电,但是两端依然连接在母线上,线路 5 的 A 相产生了一分频谐振 (50/3 Hz)。

线路 6 依然运行,并且不受铁磁谐振的影响。

图 C.5 给出了相应的线路 5 的三相波形图。在所有的三相上,可以检测到耦合自同塔的 245 kV 线路的 50 Hz 波形。A 相存在明显的耦合电容和接地电容,与电压互感器的励磁特性一起,满足产生铁磁谐振的条件。这种情形与其他两相不同。

从故障录波器看到,变电站 1 和变电站 2 之间的线路 5 检测到铁磁谐振。线路应立即接地,防止电压互感器和负荷设备损坏。

一个相似的铁磁谐振情形(见参考文献[12])是由于电容耦合在停电线路上,铁磁谐振造成设备损毁。



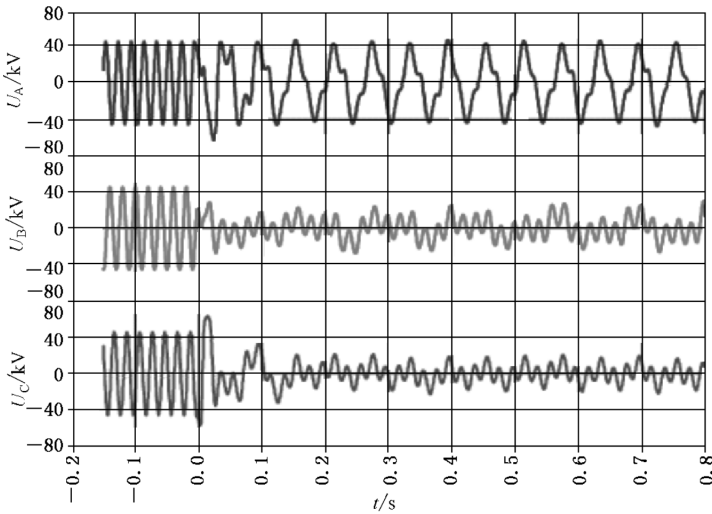
说明:

- 线路 5 变电站 2-变电站 1(60 kV);
- ⊗ 线路 6 变电站 2-变电站 1(60 kV);
- ⊕ 245 kV 线路;
- 245 kV 线路。

注: 摘自参考文献[17],经 ewz/Ch 许可。

图 C.4 两变电站间架空线同塔架线示意图

杆塔布置见图 C.4,60 kV 线路 5 和线路 6 与 245 kV 线路同杆架设。



注: 摘自参考文献[17],经 ewz/Ch 许可。

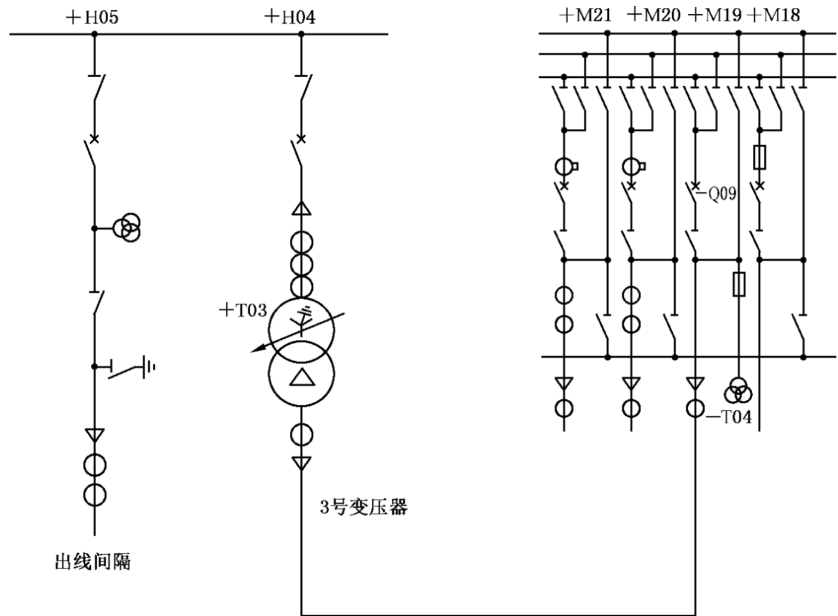
图 C.5 在 2 号变电站线路 5 上记录到的铁磁谐振波形

A 相的电压(见图 C.5)显示存在频率为三分之一分频铁磁谐振。

B 相和 C 相(见图 C.5)电压中存在耦合自系统的 245 kV 工频分量和耦合自 A 相的三分之一一次分频分量。

C.3 三相铁磁谐振

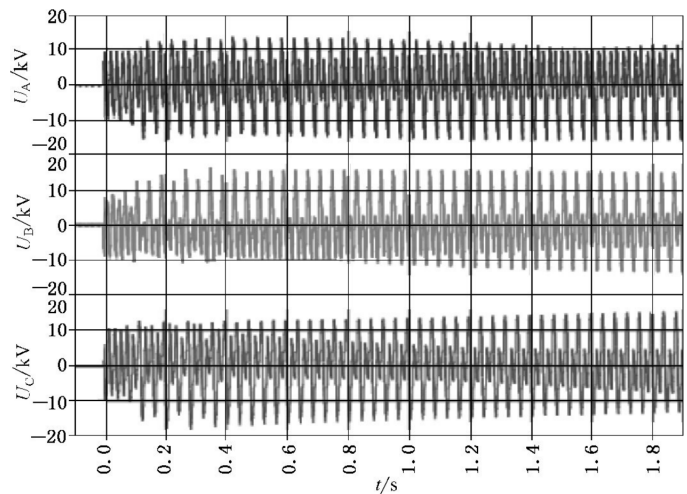
图 C.6 是同一变电站 170 kV 侧和 12 kV 侧的部分接线图。



注：摘自参考文献[17],经 ewz/Ch 许可。

图 C.6 在开关动作时发生三相铁磁谐振的 170 kV 变电站(左侧)及 12 kV 变电站(右侧)单线图

故障录波器安装在 12 kV 侧 +M19 间隔(变压器 3 供电)。在故障录波器试运行期间,170 kV 变压器间隔 +H04 带电,通过 +M19 间隔给供电区 3 供电。间隔 +M19 的断路器 Q09 断开,图 C.7 给出了电压互感器 T04 的电压波形,可以看出发生了铁磁谐振。



注：摘自参考文献[17],经 ewz/Ch 许可。

图 C.7 T04 电压互感器上的三相铁磁谐振波形

铁磁谐振的基本频率接近于二分之一分频(25 Hz),叠加在 50 Hz 信号上。铁磁谐振频率与二分之一分频 25 Hz 的偏差,导致一个非常低频的拍频^[13]。

由于铁磁谐振,电压互感器一次绕组因电流过大而损毁,之后进行了更换。为了抑制铁磁谐振,在互感器开口三角绕组增加了阻尼器。

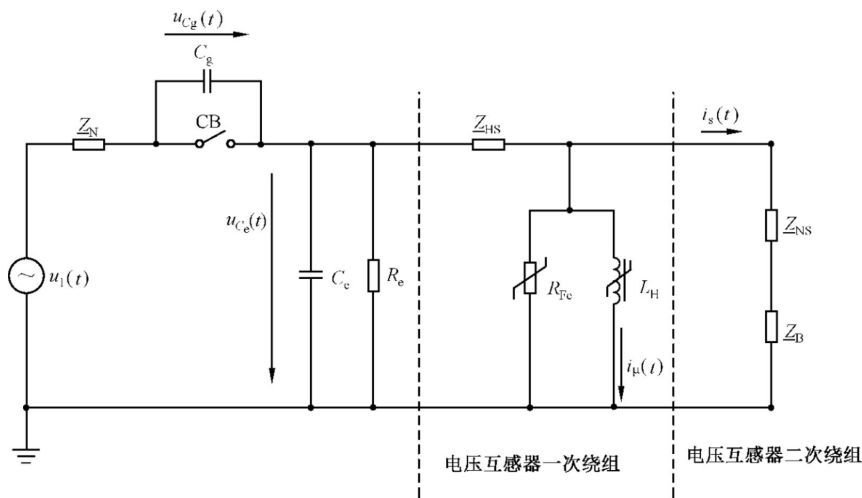
附录 D

(资料性附录)

非线性电路振荡

D.1 概述

非线性电路振荡的介绍仅限于中性点直接接地的三相网络中的单相铁磁谐振。用于计算分析的简化电路见图 D.1。



说明：

- CB —— 电流断路器；
- C_e —— 设备总对地电容(不包括一次线圈电容)；
- C_g —— 断路器 CB 断口电容；
- $i_H(t)$ —— 非线性主电感电流；
- $i_s(t)$ —— 负荷电流；
- R_e —— 相对地总绝缘电阻(互感器内部绝缘电阻,非线性泄漏电阻,如:表面泄漏电流、电晕电流以及避雷器泄漏电流)；
- R_{Fe} —— 铁损简化非线性电阻；
- L_H —— 非线性主电感；
- $u_1(t)$ —— 电流断路器前段相对地电压；
- Z_B —— 二次侧第一绕组负荷阻抗(负载电阻和电抗)；
- Z_{H1} —— 一次绕组阻抗(包括电阻及漏电抗)；
- Z_N —— 网络阻抗；
- Z_{NS} —— 二次绕组阻抗(包括电阻及漏电抗)；
- $u_{C_e}(t)$ —— 对地电容上的电压；
- $u_{C_g}(t)$ —— 断口电容上的电压。

注：摘自参考文献[10]。

图 D.1 铁磁谐振简化电路图

变电站铁磁谐振是一个典型“非线性系统强迫谐振”的实例。强迫谐振是非线性系统的正弦激励的同义词。

$$U_1(t) = \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_s) \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中的 ω 是角频率, $\omega = 2\pi f_0$, f_0 是系统频率, φ_s 是断路器 CB 操作相角 (见图 D.1)。

图 C.2 为断路器 CB 操作后的典型非线性铁磁谐振系统产生的波形。

很明显, 系统的响应, 稳态条件下的振荡, 取决于电压初始值 $u_{C_e}(t=0)$ 、 $u_{C_g}(t=0)$ 和电流 $i_\mu(t=0)$ (见图 D.1), 它们是操作相角 φ_s 的函数。

当操作相角 $\varphi_s = 90^\circ$ 时, 初始值 $u_{C_e}(t=0) = \hat{U}_1$

$$\left. \begin{aligned} u_{C_g}(t=0) &= 0 \\ i_\mu(t=0) &= i_{\mu 0} \\ i_s(t=0) &= \frac{\hat{U}_1}{Z_{NS} + Z_B} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

C_e 储存的能量:

$$W_{C_e} = \frac{1}{2} C_e \hat{U}_1^2 \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

L_H 储存的能量:

$$W_{L_H} = \frac{1}{2} L_H i_{\mu 0}^2 \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

当操作相角 $\varphi_s = 0^\circ$ 时, 初始值为 $u_{C_e}(t=0) = 0$, $u_{C_g}(t=0) = 0$, $i_\mu(t=0) = i_{\mu 0}$, $i_s(t=0) = 0$

电容 C_e 中储存的能量 $W_{C_e} = 0$; L_H 储存的能量 $W_{L_H} = \frac{1}{2} L_H i_{\mu 0}^2$

结合变电站铁磁谐振实测波形和现有的“受迫振动的非线性振动系统”理论知识, 下面的结论适用于变电站^[10]:

- 关于非线性网络的铁磁谐振的解析解是不可能的;
- 测量和计算没有叠加的瞬态的和稳态的电压 $u_s(t)$ 和电流 $i_\mu(t)$ 是可能的;
- 参数的微小变化 (在原理图 D.1 中的元件) 对结果有显著的影响;
- 由计算软件获得的数值解有助于铁磁谐振研究;
- 为了更好地对非线性系统振荡进行评估, 采用了大量的数学近似方法^[18,19], 其有效性得到实验室和数字模拟验证;
- 在非线性系统的数学处理中, 非线性元件的精确表征对结论的正确性至关重要;
- 变电站的实测结果取决于线路电压 \hat{U}_1 的幅值 $\hat{U}_1 \times \sin(\omega t + \varphi_s)$ 和断路器的操作相角 φ_s (见图 C.2)。

D.2 非线性电路的戴维南简化

为了计算方便, 使用戴维南定理简化系统。John L. Stewart 的《电路原理与设计》^[15] 明确说明, 戴维南定理仅适用于线性电路。如果电路是基于戴维南定理, 则等效电路仅用于本部分。

GB/T 20840.3、GB/T 20840.5 在非线性系统 CVT 简化中应用了戴维南定理。

铁磁谐振和暂态特性试验都可根据 GB/T 20840.3、GB/T 20840.5, 基于等效电路在完整的 CVT 上进行。

如果戴维南定理仅用于非线性系统的线性部分, 问题仍然没有解决。

D.3 铁磁谐振微分方程

下面的分析仅限于单相铁磁谐振, 针对非线性振荡这一基本的考虑, 仍然使用图 D.1 的原理电路。

铁磁谐振模型实验表明,电磁式电压互感器绕组阻抗 $\underline{Z}_{\text{HS}} = R_{\text{HS}} + j\omega L_{\text{HS}}$ 和 $\underline{Z}_{\text{NS}} = R_{\text{NS}} + j\omega L_{\text{NS}}$ 对非线性振荡的激发只有很小的影响,初步近似阻抗 $\underline{Z}_{\text{HS}}$ 和感抗 $j\omega L_{\text{NS}}$ 被忽略。

由于 $\underline{Z}_{\text{NS}} = R_{\text{NS}}$ 、 $\underline{Z}_{\text{B}} = R_{\text{B}}$,合并电阻,令:

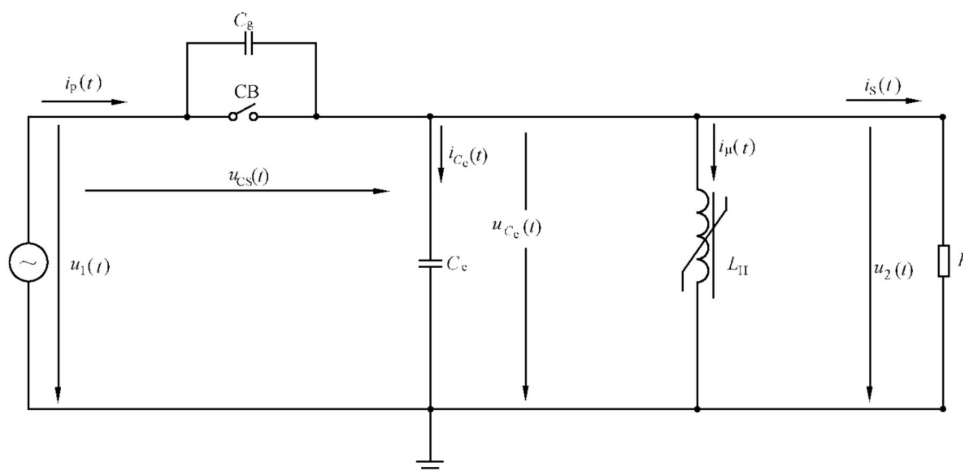
$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{e}}} + \frac{1}{R_{\text{Fe}}} + \frac{1}{k^2(R_{\text{NS}} + R_{\text{B}})}}, k = \frac{n_{\text{P}}}{n_{\text{S}}} \dots\dots\dots (\text{D.5})$$

式中:

n_{P} ——一次绕组的匝数;

n_{S} ——二次绕组匝数。

考虑到较低的网络阻抗,取 $\underline{Z}_{\text{N}} = 0$,可以忽略不计一次阻抗 $\underline{Z}_{\text{HS}}$ 。图 D.1 的修正示意图见图 D.2。



注:摘自参考文献[10]。

图 D.2 二阶非线性微分方程推导图

铁磁谐振可从一次电压波形看出:

$$k \cdot u_2(t) = \frac{n_{\text{P}} d\phi(t)}{dt} \dots\dots\dots (\text{D.6})$$

$i_{\mu}(t)$ 为一次绕组电流, $u_2(t)$ 为电磁式电压互感器二次端子上的电压(见第 10 章)。

电容 C_{e} 上的电压为:

$$u_{C_{\text{e}}}(t) = \frac{d(n_{\text{P}} \cdot \phi(t))}{dt} = \frac{d\psi(t)}{dt} \dots\dots\dots (\text{D.7})$$

下面对微分方程的求导适用于断路器打开的稳定状态,由图 D.2 可以得到下面的方程式:

$$\hat{U}_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_{\text{s}}) = \frac{1}{C_{\text{g}}} \int i_{\text{P}} dt + \frac{d\psi}{dt} \dots\dots\dots (\text{D.8})$$

$$i_{C_{\text{e}}}(t) = C_{\text{e}} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\psi}{dt} \right) \dots\dots\dots (\text{D.9})$$

式中, $\psi = n_{\text{P}} \cdot \Phi$ 。

磁化曲线用三相多项式近似。根据对称性,只有奇数指数。

$$i_{\mu}(t) = A_1 \cdot \phi(t) + A_3 \cdot \phi^3(t) + A_5 \cdot \phi^5(t) \dots\dots\dots (\text{D.10})$$

这里的单位为 $A_1[\text{A}/(\text{Vs})]$ 、 $A_3[\text{A}/(\text{V}^3 \text{s}^3)]$ 、 $A_5[\text{A}/(\text{V}^5 \text{s}^5)]$ 。

$$i_{\text{S}}(t) = \frac{1}{R} \cdot \frac{d\psi}{dt} \dots\dots\dots (\text{D.11})$$

$$i_P(t) = i_{C_e}(t) + i_\mu(t) + i_S(t) \quad \dots\dots\dots (D.12)$$

微分方程：

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{1}{R(C_g + C_e)} \cdot \frac{d\psi}{dt} + \frac{A_1}{C_g + C_e} \cdot \psi + \frac{A_3}{C_g + C_e} \cdot \psi^3 + \frac{A_5}{C_g + C_e} \cdot \psi^5 = \frac{C_g}{C_g + C_e} \cdot \hat{U}_1 \omega \cos(\omega t + \varphi_1) \quad \dots\dots\dots (D.13)$$

如果没有项 $A_5(\psi^5)$, 则是扩展的 Duffing 微分方程, 其阻尼项为

$$\frac{1}{R(C_g + C_e)} \cdot \frac{d\psi^{[20]}}{dt} \quad \dots\dots\dots (D.14)$$

D.4 铁磁谐振频率

变电站单相铁磁谐振测量表明, 如果激励是工频 f_0 , 则仅有下面的频率:

- a) 工频 50 Hz;
- b) 三分之一分频: 50/3 Hz;
- c) 五分之一分频: 10 Hz。

非线性微分方程[式(D.13)]在工频受迫振荡的解 $S_1(t)$ 、 $S_3(t)$ 、 $S_5(t)$ 、 \dots 、 $S_{2n+1}(t)$ 的描述见参考文献[10]。非线性系统振荡的简单的方框图见图 D.3。

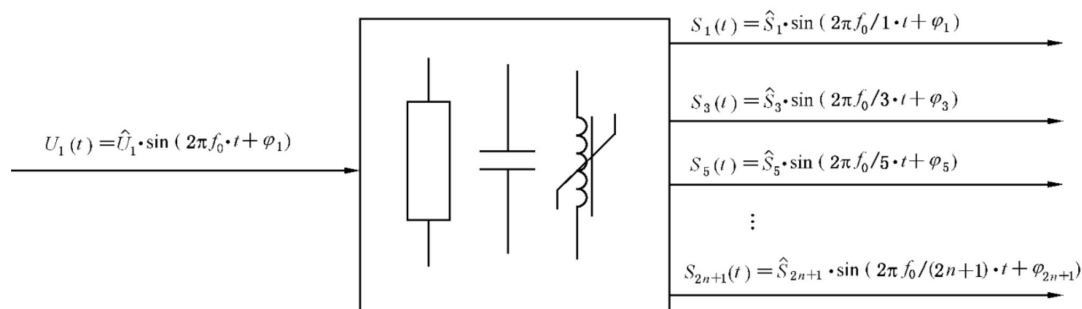


图 D.3 一个非线性谐振系统

关于稳态振荡解 $S_1(t)$ 、 $S_3(t)$ 、 \dots 、 $S_{2n+1}(t)$ 的稳定性和它们的组合见参考文献[10]。

参 考 文 献

- [1] RÜDENBERG R. Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Stromkreisen von Starkstromanlagen. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 4. Auflage, 1953.
- [2] HEUCK, K., DETTMANN, K.-D., REUTER E. Elektrische Energieversorgung, vieweg Verlag, Braunschweig 2002, ISBN 3-528-48547-7.
- [3] BERGMANN C. Kippschwingungen in Drehstromnetzen, Dissertation D83, Fakultät Elektrotechnik, TU Berlin 1966.
- [4] BERGMANN C., Grundlegende Untersuchungen über Kippschwingungen in Drehstromnetzen, ETZ-A Band 88 (1967), H.12, pp.292-298.
- [5] GERMAY N., MASTERO S. & VROMAN J. Review of ferroresonance phenomena in high-voltage power system and presentation of a voltage transformer model for predetermining them, Cigré Session Paris 1974 Session 21-29 August, Paper 33-18.
- [6] JACOBSON, D. Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System, IEEE Power Engineering Societa, 2003.
- [7] IEC 60071-1 Insulation co-ordination—Part 1: Definitions, principles and rules
- [8] BRÄUNLICH R., DÄUMLING H., HOFSTETTER M., PRUCKER U., SCHMID J., SCHLIERF H. W., MINKNER R. Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen Teil 1: Definitionen und allgemeine Erklärungen, Bulletin SEV/AES 2006, Heft 23, pp.17-22. Available from: <fkf.ch/pdf_files/Paper/2006%20Ferroresonanz%201.pdf>
- [9] MAGNUS K., POPP K. Schwingungen, eine Einführung in physikalische Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen. Teubner-Verlag, 6. Auflage; Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2002.
- [10] MINKNER, R., et.al. Ferroresonance oscillations in substations with inductive voltage transformers in medium and high voltage systems. vde Verlag, Frankfurt, ISBN 978-3-8007-3395-8
- [11] LAPIERRE, C. W. Theory of Abnormal Line-to-Neutral Transformer Voltages. AIEE Transactions 50 (1931)p.328.
- [12] KÖPPL G., LÄDERACH S., LÜKE E., UMLAUF A. Ferroresonanz-ein weiterhin aktuelles Problem, Bulletin SEV/VSE, Band 19, 1995, pp.19-23.
- [13] BRÄUNLICH R., DÄUMLING H., HOFSTETTER M., PRUCKER U., SCHMID J., SCHLIERF H. W., Minkner R. Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen Teil 3: Parameter von Ferroresonanzkreisen und Methoden zur Untersuchung. Bulletin SEV/AES 2008, Heft 22/23, pp.33-40.
- [14] ETCHEBAME P., GUAN F. Three-phase ferroresonance oscillations in high-voltage substations. Supelec, Paris; Master Thesis, 28.03.2011.
- [15] STEWART, John L. Theorie und Entwurf elektrischer Netzwerke. 1959; Berliner Union Stuttgart, DK 621.372.
- [16] BRÄUNLICH R., DÄUMLING H., HOFSTETTER M., PRUCKER U., SCHMID J., SCHLIERF H. W., MINKNER R. Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen Teil 4: Behebung von Ferroresonanzschwingungen. Bulletin SEV/AES 2009, Heft 1, pp.23-29.
- [17] BRÄUNLICH R., DÄUMLING H., HOFSTETTER M., PRUCKER U., SCHMID J., SCHLIERF H. W., MINKNER R. Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen

Teil 2: Fallbeispiele. Bulletin SEV/AES 2006, Heft 24/25, pp. 27-30. Available from: <http://fkh.ch/pdf_files/Paper/2006%20Ferroresonanz%202.pdf>

[18] GUCKENHEIMER, J., HOLMES, P. Non Linear Oscillations, Dynamik Systems and Bifurcations of Vector Fields. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. ISBN 0-387-90819-6

[19] DIRSCHMID, H.J. Mathematische Grundlagen der Elektrotechnik, 1986, Vieweg Verlag; ISBN 3-528-03034-8

[20] PHILOPPOW, E.: Nichtlineare Elektrotechnki. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig; 1963 (Geest & Portig K.-G.)

[21] IEC 61869-3 Instrument transformers—Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers

[22] IEC 61869-4 Instrument transformers—Part 4: Additional requirements for combined transformers
