




清华大学
Tsinghua University

复习、作业、预习

复习: 5.5、5.6、5.7、5.8, 6.1、6.2
作业: 6-2、6-8, 补充3道 (见网络学堂)
预习: 6.3、6.4, 7.1、7.2

1



清华大学
Tsinghua University

网络教学直播方式: 雨课堂

高电压工程一第A讲
之绝缘检测与诊断 (2)
高电压与大电流的产生 (1)

周远翔
zhou-yx@tsinghua.edu.cn
MB: 13911097570
清华大学电机工程与应用电子技术系

1

专题: 高电压实验

周远翔
清华大学电机工程与应用电子技术系
Email: zhou-yx@tsinghua.edu.cn
MB: 13911097570

3

目录

一、高压实验室安全、卫生制度
二、高压实验室学生实验规则
三、实验内容及指导教师
四、《高电压工程》实验时间安排 (例)

4

一、高压实验室安全、卫生制度

1. 实验前教师应对学生进行安全教育
2. 高电压试验不得少于2人, 实验前要熟读设备、仪器的安全操作规程, 并检查接线正确无误
3. 严格禁止带电接线或拆线
4. 非本次实验使用的仪器设备, 未经教师或负责人同意不得动用
5. 实验后要拉闸断电, 将实验用品整理好, 放回原处并做好卫生整洁工作
6. 发生事故要保持镇定, 迅速切断电源, 向负责教师报告情况, 若损坏仪器设备, 要做出书面检查, 等候处理
7. 实验室内禁止吸烟、吃东西、随地吐痰、乱扔脏物, 不许大声喧哗、打闹, 保持整洁、服从负责人指导, 定期进行整理及清扫
8. 下班前要对本室的水、电、门、窗进行检查, 方可离室。实验室设轮流值班员进行总体检查, 确保安全
9. 下班后来室工作需要经实验室同意, 向值班员报告, 做到准时离室

5

二、高压实验室学生实验规则

<ol style="list-style-type: none">1. 学生进行高压实验, 必须充分预习, 并完成指定的各项任务, 各組人数不少于2人2. 实验前, 要认真检查。内容包括: 设备、仪表、接线安全距离、接地、接地杆、遮栏联锁以及其它保护措施, 确认无误由指导教师检查后, 方可接通电源, 不得带电接线3. 做高压实验必须严肃、认真, 精力集中, 不得谈笑, 不得擅自离岗; 几项重要的操作一定要呼叫口令, 确保安全4. 实验过程中要仔细观察仪器、仪表、实验现象, 认真做好记录, 实验结果经教师签字后方可拆除线路5. 发生事故要保持镇定, 迅速切断电源,	<ol style="list-style-type: none">保持现场并报告指导教师或实验室主任; 若有人触电, 应立即抢救; 若着火应及时扑灭6. 实验完毕, 必须用接地杆对高压部位放电。对电容性的设备, 应经电阻放电后再进行放电, 否则不可接近和接触试验设备7. 要保持试验区整洁、安静。实验结束后, 要及时去除电源, 将有关试验用品整理好8. 发生事故、损坏仪器设备, 必须立即向指导教师或实验室主任报告。事后应立即作出书面检查或报告, 责任事故要酌情赔偿9. 实验室内不准吸烟、点火10. 发烧、头晕、失眠、精神不佳或精神失常者不得进行实验。实验室闭馆后, 不得进行实验
---	---

6

三、实验内容及指导教师

- 实验一、间隙击穿实验
指导教师：付洋洋、杨元彪、白正、程佳玉、王玺然、梅航岳
- 实验二、局部放电实验
指导教师：高胜友
- 实验三、电介质材料特性实验
指导教师：仵超
- 实验四、电晕测量
指导教师：王鹏

实验一为必做；实验二、三和四为任选做，每人限选1项。每项选做实验不超过12组（中文班30组，英文班有7组，多出的一个组的选择可与助教商量）

四、《高电压工程》实验时间安排（例）

时间 星期 实验	12周（周一至周日）				13周				14周			
	周一	周二	周三	周四	周一	周二	周三	周四	周一	周二	周三	周四
实验一 (20)	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55	14:20 16:55
实验二 (20)												
实验三 (20)												
实验四 (20)												
实验五 (20)												
实验六 (20)												
实验七 (20)												
实验八 (20)												

共37个组：中文班30组（C101-C130）；英文班7组（Y101-Y107）

敬请注意！

实验联系教师：高胜友
MB: 13691484232



网络教学直播方式：雨课堂

高电压工程一第A讲
之绝缘检测与诊断（2）

周远翔
zhou-yx@tsinghua.edu.cn
MB: 13911097570
清华大学电机工程与应用电子技术系



第5章 绝缘诊断与绝缘试验

- 5.1 绝缘监测和诊断的基本概念
- 5.2 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 5.3 介电损耗角正切的测量
- 5.4 局部放电的测量
- 5.5 绝缘油中溶解气体的色谱分析
- 5.6 耐压试验
- 5.7 耐压试验与预防性试验方法的特点
- 5.8 绝缘的在线监测（自学）

投票 最多可选1项

设置

绝缘油中可能存在的气体是：

- A 空气
- B 绝缘材料和金属等分离出的气体
- C 绝缘材料裂解出的气体
- D 上述几种气体都存在

提交



5.5 绝缘油中溶解气体的色谱分析

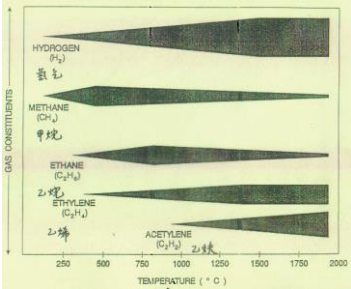
1. 绝缘油中溶解气体的来源

- **非故障类气体**：新绝缘油中溶解的气体主要是空气，空气中含有 N_2 (78.1%)、 O_2 (20.9%) 和少量的惰性气体、 CO 及水蒸气等；油中水、固体绝缘材料、光照等发生化学反应生成气体.....这些气体的在含量有限的情况下，一般不影响设备的正常运行。
- **故障类气体**：电性、热性故障或老化引起油、纸绝缘结构裂解产生的气体

13



绝缘油中过热生成的特征气体与温度的关系



14



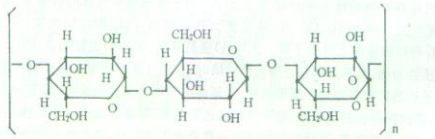
变压器油分解产生的特征气体

- **变压器油主要成分**：碳氢化合物，如烷烃、环烷烃、芳香烃、烯烃等
- ✓ 温度小于800度时热解产生：低分子烷烃（甲烷 CH_4 、乙烷 C_2H_6 ）、低分子烯烃（乙烯 C_2H_4 、丙烯 C_3H_6 ）、氢气（ H_2 ）
- ✓ 变压器油中电弧放电分解的气体：大部分为 H_2 、 C_2H_2 （乙炔），并有一定的 CH_4 、 C_2H_4
- ✓ 发生局部放电时：绝缘油分解的主要气体是 H_2 和少量的 CH_4
- ✓ 发生火花放电时：则还有较多的 C_2H_2

15



绝缘纸、绝缘纸板的分解



纤维素的分子结构，葡萄糖基以1-4配键连接，化学通式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ ， n 为聚合度，一般新纸 $n=1300$ ，老化后寿命终止约为150-200，出现 CO 和 CO_2 等

16



不同故障类型产生的特征气体组分 GB 7252

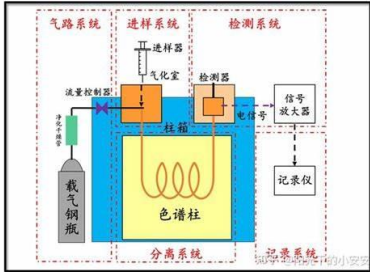
故障类型	主要气体组分	次要气体组分
油过热 油中火花放电 油中电弧	CH_4 、 C_2H_4 H_2 、 C_2H_2 H_2 、 C_2H_2	H_2 、 C_2H_6 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6
油和纸过热 油纸绝缘局部放电 油和纸中电弧	CH_4 、 C_2H_4 、 CO 、 CO_2 H_2 、 CH_4 、 CO H_2 、 C_2H_2 、 CO 、 CO_2	H_2 、 C_2H_6 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CO_2 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6

注：受潮或油中气泡可能使油中 H_2 含量升高

17



2. 测量绝缘油中溶解气体的气相色谱法



18

3. 油中溶解气体分析故障

(1) 特征气体成分与故障类型

(2) 特征气体含量与故障程度

(3) 特征气体含量随时间的增长率与故障程度

(4) 故障特征的综合判断: 三比值法

• 判断变压器或电抗器等充油电气设备故障性质的主要方法

• 取出 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 及 C_2H_6 这五种特征气体含量, 分别计算出 C_2H_2/C_2H_4 、 CH_4/H_2 、 C_2H_4/C_2H_6 这三对比值, 再将这三对比值按一定规则进行编码, 再按一定规则来判断故障的性质

• 如比值为0:1:0时, 则设备内部发生高湿度、高含气量引起的油中低能量密度局部放电

19

第5章 绝缘诊断与绝缘试验

5.1 绝缘监测和诊断的基本概念

5.2 绝缘电阻和泄漏电流的测量

5.3 介损损耗角正切值的测量

5.4 局部放电的测量

5.5 绝缘油中溶解气体的色谱分析

5.6 耐压试验

5.6.1 交流耐压试验

5.6.2 直流耐压试验

5.6.3 雷电冲击耐压试验

5.6.4 操作冲击耐压试验

5.7 耐压试验与预防性试验方法的特点

5.8 绝缘的在线监测 (自学)

20

5.6 耐压试验

5.6.1 交流耐压

• 加压方式: 外施耐压试验和感应耐压试验

• 耐压时间: 1 min, SF₆断路器等5 min;

• 标准要求的试验电压


• DL/T 596《电力设备预防性试验规程》: 大修且全部更换绕组的试验电压为出厂试验电压, 其余为出厂的85% (也可参看国家标准GB 1094.3)

• 分级绝缘的变压器, 外施交流耐压试验按中性点端子规定的试验电压进行

• 倍频感应耐压试验, 耐压时间 $t=60 \times 100/f$

1000kV 变压器: $U_m=1100kV$, $U_{withstand}=1100kV$

500kV 变压器: $U_m=550kV$, $U_{withstand}=680kV$



长治特高压变电站局部放电现场试验

21

5.6.2 直流耐压

• 交流设备进行直流耐压试验时需要慎重选择试验电压

• 对电力变压器绝缘进行泄漏电流试验, 电压不高, 可以认为为非破坏性试验

• 对于大电容设备如电缆等进行的试验, 注意复合绝缘如油纸绝缘, 在交、直流下的电压分布不一样

➢ 交流电压下, 电压较多作用在油层上, 油的耐电强度低

➢ 直流电压下, 电压较多作用在纸上, 纸的耐电强度较高

➢ 所以油纸绝缘电缆能够耐受较高的直流电压

➢ 油纸绝缘电缆耐压试验5 min

• 直流电压下存在空间电荷聚集引起电场畸变, 导致绝缘破坏的风险。出现过直流耐压试验后, 进行局部放电的工频耐压试验局部放电水平超标的现象。

22

投票 最多可选1项

是否同意交流电气设备用直流耐压试验代替交流耐压试验?

A 同意

B 不同意

提交

23

5.6.3 雷电冲击耐压

• 国家标准规定110 kV及以上变压器出厂时进行本项试验, 绝缘预防性试验和工程交接试验不做本项试验

• 为避免累积效应造成绝缘损伤, 在规定的试验电压下只施加3次冲击

5.6.4 操作冲击耐压

• 额定电压220 kV及以上的电变压器(?)、330kV及以上的其他电力设备出厂试验应进行本项试验


• 加压方式

➢ 直接加压, 一般在工厂和实验室进行

➢ 操作冲击感应耐压方式, 在现场进行, 亦可在工厂进行, 利用变压器自身的电磁感应作用来升高电压

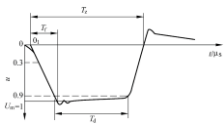
• 操作冲击试验不会在绝缘中造成残留性损伤

24



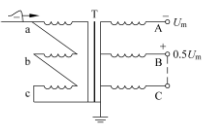
●IEC 60076-3和国家标准GB 1094.3对电力变压器内绝缘操作波试验的波形均有规定

- 第一个半波为负，视在波前时间 T_f 不小于100 μs ，通常小于250 μs
- 视在波长时间 T_λ 不小于500 μs ，最好能达到1000 μs
- 90%峰值持续时间 T_d 不小于200 μs



●试验（直接加压、感应加压）

- GB规定的变压器试验接线
- GB 1094.3、JB/T 10780规定了220 kV~500 kV变压器线端的操作冲击耐受电压



25




5.7 各种预防性试验方法的特点总结

●各种预防性试验方法的特点

序号	试验方法	能发现的缺陷
1	测量绝缘电阻及泄漏电流	贯穿性的受潮、脏污和导电通道
2	测量吸收比	大面积受潮、贯穿性的集中缺陷
3	测量tan δ	绝缘普遍受潮和劣化
4	测量局部放电	有气体放电的局部缺陷
5	油的气相色谱分析	持续性的局部过热和局部放电
6	交流或直流耐压试验	使抗电强度下降到一定程度的主绝缘局部缺陷
7	操作波或倍频感应耐压试验(限于变压器)	使抗电强度下降到一定程度的主绝缘或纵绝缘的局部缺陷

表中序号6和7两项为破坏性试验，其它各项均属于非破坏性试验

26



高电压工程一
之高电压和大电流的产生 (1)

第5讲 高电压和大电流的产生


周远翔

zhou-yx@tsinghua.edu.cn

MB: 13911097570

清华大学电机工程与应用电子技术系

27



第6章 高电压和冲击大电流的产生


6.1 交流高电压的产生

6.2 直流高电压的产生

6.3 冲击高电压的产生

6.4 冲击大电流的产生 (自学)

28



6.1 交流高电压的产生

6.1.1 概述


6.1.2 试验变压器的电压与容量

6.1.3 串级高压试验变压器

6.1.4 试验变压器容性试品上的电压升高

6.1.5 高压串联谐振试验设备

29



6.1.1 概述


1. 试验变压器的用途

- 交流高压试验设备：主要是指高压试验变压器，还有高压串联谐振试验设备
- 用途

(1) 产生试验用的工频电压；(2) 作为直流、冲击电压发生器电源；(3) 产生操作冲击电压

- 可产生长波前类型的操作冲击波
- 产生工频高电压作用在被试电气设备的绝缘上，考查电气设备的绝缘水平
- 研究高压发电、输电系统的特性
- ✓气体绝缘间隔、电晕损耗、长串绝缘子的闪络电压
- ✓电力设备内部绝缘中的局部放电、静电感应、带电作业等

- 试验设备水平
- ✓目前我国和多数发达工业国具备2250 kV试验变压器
- ✓个别国家已达到3000 kV



30


2. 试验变压器与电力变压器区别与联系

试验变压器与电力变压器的运行条件不同

运行条件	试验变压器	电力变压器
使用场所	户内	户外
负荷性质	容性	感性
设备容量	小	大
工作时间	短	长
运行温度	低	高
安全系数	小 (1.1)	大 (第5章)

连续工作时间不同

- 试验变压器只能做短时运行，在额定功率下只能连续工作30 min
- 有的特高压试验变压器，在额定电压及容量下只能运行5 min
- 电力变压器则在额定条件下可连续运行




31

3. 试验变压器的安全系数

试验变压器的安全系数比电力变压器的小

试验变压器的试验电压与安全系数

- 50 kV~250 kV 的比其额定电压仅高25 kV (1.5倍到1.1倍)
- 更高电压 (≥300 kV) 的仅高10% (1.1倍额定电压)
- 500 kV试验变压器的5 min 100 Hz自感应试验电压为550 kV，高10% (1.1倍)
- 国产YDC—1500/1500二级串级试验变压器，单台750 kV变压器的自感应试验电压为额定的110% (1.1倍)；两台串级时的仅为额定的105% (1.05倍)



32

多选题 1分

以下哪些电压是线电压?

- ☒ A 电网的电压等级
- ☐ B 相对地电压
- ☒ C 相对相电压
- ☒ D 设备最高工作电压
- ☐ E 工频耐受电压

提交

33

电力变压器的试验电压

- 预防性试验规程规定，大修全部更换绕组的试验电压为出厂试验电压，其余为出厂的86%
- 电力变压器的出厂1 min工频试验电压

35 kV (40.5 kV)	的为 85 kV	(3.64倍)
110 kV (126 kV)	的为 200 kV	(2.75倍)
220 kV (252 kV)	的为 395 kV	(2.71倍)
330 kV (363 kV)	的为 510 kV	(2.43倍)
500 kV (550 kV)	的为 680 kV	(2.14倍)
750 kV (800 kV)	的为 900 kV	(1.95倍)
1000 kV (1100 kV)	的为 1100 kV	(1.73倍, 5min)

试验电压倍数 = $\frac{\text{试验电压}}{\text{最高工作电压} / \sqrt{3}}$

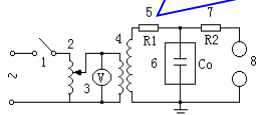
- 试验变压器铁心的磁通密度小
- 无晕试验变压器可满足局部放电测试的要求



34

4. 试验变压器的接线

变压器保护电阻的阻值由厂家提供，如无厂家数据则按0.1 Ω/V选取



工频高压试验的基本电路

1-电源开关； 2-调压器； 3-电压表； 4-试验变压器；
5-变压器保护电阻； 6-试品； 7-测量铜球保护电阻； 8-测量铜球

35

5. 试验电压的频率和波形

- 交流耐压试验时
- 击穿与峰值有关
- 有些材料击穿与频率有关
- 电压波形3次谐波分量较大时，峰值与有效值之比达1.45~1.55，不是 $\sqrt{2}$
- 相关标准
- GB/T 16927.1
- IEC 60060-1
- 规定试验电压波形
- 频率：45~65 Hz，特殊试验可根据设备标准规定
- 波形：两个半波相同的近似正弦波，峰值和方均根（有效）值之比：

GB和IEC均为 $\sqrt{2} \pm 0.05$

电压波形的畸变规定：谐波的方均根值不大于基波方均根值的5%，则认为波形基本上满足上述要求

36

6.1.2 试验变压器的电压与容量

1. 常规试验变压器

额定电压kV	5	10	25	35	50	100	150	250
额定容量 kVA	3	3	3	3	5	10	25	250
	5	5	5	5	10	25	50	500
	10	10	10	10	25	50	100	1000
		25	25	25	50	100	150	
			50	50	100	200	300	
				100	250	250		
				150	500	400		
				200	750			
额定电压kV	300	500	750	1000	1500	2250		
额定容量 kVA	300	300	750	1000	750	2250		
	1200	500	1500	2000	1500	9000		
		1000	3000					
		1500						37

2. 试验变压器选型

(1) 试验变压器的电压: U_0 应不低于试验电压 U

(2) 试验变压器的电流: $I_0 \geq I = \omega C U \times 10^{-9}$ A (有效值)

(3) 试验变压器的容量: $P_0 > P_1 = \omega C U^2 \times 10^{-9}$ kVA

✓ ω : 所加电压的角频率

✓ C : 试品的电容量 pF

● 常见的试品电容量

试品名称	电容量 (pF)
线路绝缘子	<50
高压套管	50~600
高压断路器, 电流互感器, 电容式电压互感器	100~1000
电容式电压互感器	3000~5000
电力变压器	1000~15000
电力电缆 (每米)	150~400
SF ₆ 绝缘的 GIS	1000~10000

38

例 选用试验变压器额定电压及容量实例

某二次变电所需对大修后的一台 35 kV/10 kV / 3200 kVA 的电力变压器进行高压绕组对低压绕组和铁芯、铁外壳 (后两者良好接地) 进行工频耐压试验, 已用电桥测出其高压绕组对低压绕组和地之间的电容量为 5870 pF, 请选择一台合适的高压试验变压器。

➢ 确定参数:

✓ 确定试验电压: 查阅有关规程 (见第 5 章的交流耐压试验) 可知, 此时变压器应施加的试验电压应为 $85 \text{ kV} \times 85\% = 72 \text{ kV}$

✓ 计算试验电流: 加压时, 试验变压器高压绕组流过的电流有效值为:

$$I_1 = \omega C U \times 10^{-9} \text{ A} = 2\pi f C U \times 10^{-9} = 314 \times 5870 \times 72 \times 10^{-9} = 0.133 \text{ A}$$

✓ 所需的试验容量:

$$P_1 = I_1 U \text{ kVA} = 0.133 \text{ A} \times 72 \text{ kV} = 9.58 \text{ kVA}$$

➢ 选择试验变压器

✓ 选择试验变压器的电压: 常规试验变压器的额定电压选 100 kV

✓ 选择试验变压器容量: 试验变压器的额定容量不能选择 10 kVA 的, 因为这种容量的变压器高压绕组最大只能流过 0.1 A

✓ 确定试验变压器: 此时应选择 100 kV/25 kVA 的现成商品试验变压器以满足选取原则。即 25 kVA > 13.3 kVA

39

3. 大电容量负载的试验变压器

● 电流电压损耗时变压器容量的选取

➢ 容量选取原则: 有试验线路的高压试验室中, 往往需要供应较大的电容电流及电晕电流

➢ 线路损耗电流: 架设试验线路的目的之一是研究电晕损耗, 为了测量准确起见, 线路较长是有利的, 但又由于经济上的考虑, 有时高压试验线路选取 500 m 左右, 根据运行经验选取

✓ 330 kV 的试验线路, 选取 1 安培制的试验变压器

✓ 500 kV 及以上的试验线路, 1 安培制试验变压器无法满足要求。

✓ 750 kV 的试验线路电晕损耗, 需要变压器供给 3 A 左右的电流

✓ 特高压交流 1000 kV, 我国特高压交流 1000 kV、1000 m 的三相试验线路; 苏联 1150 kV、1170 m 的三相试验线路, 变压器 1150/500/10kV, 3X417MVA

● 解决试验容量不足的各种方法

➢ 特大电晕损耗

➢ 电缆厂的成卷高压电缆

➢ 特大容量发电机

➢ 耐压试验时容量不足时的解决方法

✓ 特制试验变压器来适应试验功率的要求

✓ 采用串联谐振装置来满足试验的要求

✓ 采用低频 (2 Hz) 和超低频 (0.1 Hz) 的耐压试验方法

✓ 感性补偿: 电感器并联电容性试品, 减小变压器高压绕组中的电流

补修后波形不好
测介损及电晕损耗时
不适用

40

投票 最多可选 1 项

对于特大容量交流电力设备的耐压试验, 你觉得采用什么样的电源好?

☐ A 特制大容量试验变压器

☐ B 采用串联谐振装置

☐ C 采用低频或超低频装置

☐ D 采用感性补偿装置

提交

41

4. 电晕性负载的试验变压器

➢ 电晕性负载: 绝缘体闪试验及染污放电试验时, 电晕电流较大

✓ 线路试验: 一般湿闪试验电晕性电流可达几十毫安, 所以 1 安培制的试验变压器是可以满足要求的

➢ 线路设备短路电流要求: 为了保证有较准确的击穿电压值, 试验装置的短路容量或短路电流有一定的要求。国家标准规定:

✓ 对固体及液体或两者组合的绝缘样本的干试和对自恢复绝缘 (绝缘子、隔离开关) 等的干试短路电流均不小于 0.1 A (有效值)

✓ 对自恢复绝缘 (绝缘子、隔离开关) 等的湿试则不小于 0.5 A (有效值)

✓ 对于会产生大泄漏电流的大尺寸试品的湿试验, 短路电流可能达到 1 A

✓ 对于人工秽试验

✓ 要求试验设备的短路电流一般为 15 A (有效值) 或以上

· 电阻与电抗之比 $(R/X) \geq 0.1$

· 电容电流与短路电流之比在 0.001~0.1 范围之内

42

6.1.3 串级高压试验变压器

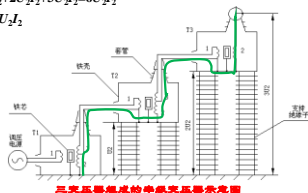
串级变压器的基本原理： n 台变压器的高压绕组串联获得 n 倍输出电压的装置

➢ 空载容量与容量： $U_1 I_1 + 2U_2 I_2 + 3U_3 I_3 = 6U_2 I_2$

➢ 额定输出额定容量： $3U_2 I_2$

➢ 容量利用率低

➢ 一般串级数： $n \leq 3 \sim 4$



三台变压器组成的串级变压器示意图

43

6.1.4 试验变压器容性试品上的电压升高

● 试验变压器容性试品上的电压升高

暂态性的电压升高（容升效应）、暂态性的电压升高（调压谐振及闪络暂态效应）

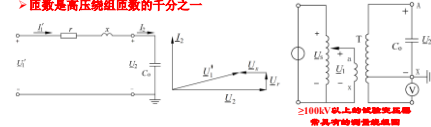
1. 暂态性的电压升高

导致的问题是试品上的电压不能按试验变压器的变比来得到

➢ 试验变压器的测量绕组

➢ 一般 ≥ 100 kV的试验变压器常备有第三个绕组专供测量电压之用

➢ 匝数是高压绕组匝数的千分之一



≥ 100 kV 以上的试验变压器常备有测量电压绕组

44

6.1.4 试验变压器容性试品上的电压升高

2. 暂态性的电压升高

➢ 情况1：串联谐振

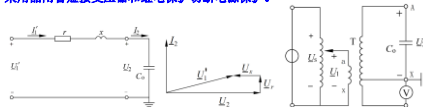
✓ 调压器的短路电抗与位置有关，调压过程中可以发生串联谐振。

✓ 采用球隙保护。

➢ 情况2：极性效应

✓ 容性试品在正半周发生空气中绝缘闪络，过零恢复，负半周电压幅值因谐振升高。

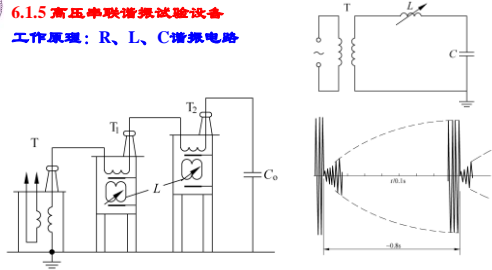
✓ 采用晶闸管短接变压器和继电保护切断电源保护。



45

6.1.5 高压串联谐振试验设备

工作原理： R 、 L 、 C 谐振电路



46

6.2 直流高电压的产生

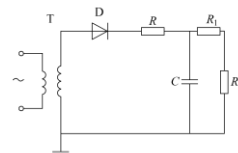
6.2.1 半波整流电路

6.2.2 直流输出电压和纹波因数

6.2.3 保护电阻与破壊选择

6.2.4 倍压直流与串级直流装置

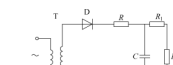
6.2.1 半波整流装置




T: 试验用变压器; C: 滤波电容器
D: 高压硅堆; R: 保护电阻
Rx: 试品; R1: 限流电阻

半波整流电路

48



半波整流电路输出电压波形



- 无负载电路与电压确定关系
- t_1 : 是D导通时间
- t_2 : 是D的截止时间
- 半波整流电路输出电压波形
- U_2 : 变压器电压 (有效值)
- U_{max} : 直流电压最大值
- U_{min} : 直流电压最小值
- U_a : 直流电压算术平均值
- δU : 脉动电压
- $$\delta U = (U_{max} - U_{min})/2$$
- 滤波系数 $S = \delta U / U_a$
- 电容充电 : 在 t_1 时间内C向 R_L 输出的电荷量, 时间由T到C输出的电荷 $Q_1 = I_a T$ 来补偿
- $$\delta U = Q_1 / 2C = I_a / (2C f)$$
- $$S = \delta U / U_a = I_a / (2C f U_a)$$

投票

最多可选1项

设置

直流电压越高，纹波系数越容易控制在较小的范围

☒ A

同意

☐ B

不同意

提交

例

国家标准规定 $S \leq 3\%$ ，采用半波整流装备产生 50 kV 直流电压，用它来进行一项绝缘耐压试验，考虑流过试品及电阻分压器的电流 I_d 不会超过 5 mA ，求应加上多大电容量的滤波电容 C ？

【题解】

为节省设备投资， T 采用工频试验变压器， $f = 50\text{ Hz}$

把已知数代入

$$S = I_d / (2\sqrt{C} U_d) \quad , \quad \text{则}$$

$$C = 5\text{ mA} / (0.03 \times 2 \times 50 \times 50\text{ kV s}^{-1})$$

$$= 0.033\text{ }\mu\text{F}$$

∴ 滤波电容 C 的电容量应不小于 $0.033\text{ }\mu\text{F}$

6.2.3 保护电阻与续流选择

- **保护电阻：**抑制流过二极管的电流

$$R \geq \sqrt{2} U_T / I_s$$

- **额定反峰电压的取值：**在二极管或高压堆截止时，在管子两端允许施加的最高反向工作电压值，称为它的额定反峰电压值。其取值 $U_{\text{r}} \geq 2.1 U_{\text{max}}$

T : 试验用变压器;

D : 高压硅堆;

R : 电阻;

R_L : 负载;

C : 电容;

C : 滤波电容器

R_L : 保护电阻

R_L : 限流电阻

半波整流电路

52

6.2.4 倍压电路与串级直流装置


●倍压电路的工作原理

>变压器输出电压峰值 $\sqrt{2}U_T$

直流高压 $2\sqrt{2} U_T$

$U_{C1} = U_{C2} = \sqrt{2} U_T$
 $U_B = \sqrt{2} U_T$
 $U_A \text{ 可达 } 2\sqrt{2} U_T$

>要求变压器绝缘水平高



高压无变压器不接地的直流倍压电路

- **变压器一端接地的直流高压电路**
- **变压器一端接地：** 降压变压器的绝缘水平，可采用普通型变压器作为直流电源的变压器
- **高压绝缘：**
- ✓ **电容 C_1 充电：** 当1的高压绕组的一端3相对于0点电压为负时， D_1 正向导通，使电容 C_1 充电。电容稳定后点1相对于3建立起 U_{C1} 的电压
- ✓ **D_1 截止：** 当点1相对于0为正时， D_1 开始截止
- **电容 C_2 充电：** 在点1相对于2为正时 D_2 导通，电容 C_2 充电。充电稳定时，由于在点3相对于1的最高电压可达 $-U_{C1}$ ，而点1相对于3已充有 $+U_{C1}$ 电压，所以点1的对地电压最高可达 $+2U_{C1}$ ，此时 D_2 导通，最终可使 C_2 上充 $2U_{C1}$ 的电压

- **脉动系数**
- 与半波整流一样

- **变压器一端接地的直流高压电路**
- **变压器一端接地时的各点电压**

- **变压器一端接地的直流高压电路**
- **变压器一端接地时的各点电压**

54



●串联直流装置

➢概念：倍压电路的积木式的迭加

➢电压脉动幅值：

$$\delta U \approx [n(n+1) I_d] / (4fC)$$

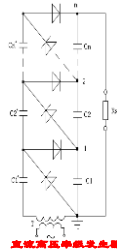
➢压降：

$$\Delta U = [(8n^3 + 3n^2 + n) I_d] / (12fC)$$

✓ δU 随级数 n 的平方倍关系上升

✓ ΔU 则随 n 的立方倍关系上升

✓当级数 n 超过一定值时，再增加 n 将无助于输出电压的增加，而元件数量和整个结构高度则会随 n 而正比上升，这一点在设计时应予注意



55



清华大学
Tsinghua University

高电压工程—第A讲

之 绝缘检测与诊断 (2)

高电压和大电流的产生 (1)

第5讲 The End

谢谢！

56