

# 絕緣材料的性質与試驗

## ( 附 高 压 試 驗 設 备 )

刘 紹 峻 編 著

科 技 卫 生 出 版 社

# 絕緣材料的性質与試驗

(附高压試驗設備)

劉紹峻編著

科技卫生出版社

## 內 容 提 要

本書分爲兩大編。第一編是高压試驗設備，內容包括：①高压電源設備；②高電壓的度量；③示波器分壓器等；④電容器、電阻器與試驗室之裝置。第二編是絕緣材料的性質與試驗，內容包括：①介質常數與極化；②絕緣電阻；③絕緣電阻的度量；④吸收現象與介質損失；⑤介質常數與介質損失的度量；⑥絕緣強度；⑦絕緣強度的試驗；⑧突波試驗；⑨其他電工試驗；⑩絕緣材料的機械物理化學性質；⑪絕緣材料的耐熱性能。本書是從電氣機器與絕緣材料製造的技術人員、電機電器運行與維護的技術人員、以及從事高压電絕緣材料與電工材料等課教學的人員、電機工程各專業三年級以上的學生參考閱讀之用。

## 絕緣材料的性質與試驗

(附高压試驗設備)

編著者 劉紹峻

科技衛生出版社出版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可証出093號

大眾文化印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

統一書號：15 · 276

(原大東·科技版共印3,200冊)

開本 787×1092 1/27 · 印張 16 2/27 · 字數 328,000

1958年11月新1版

1958年11月第1次印刷·印數1—2,000

定價：(10) 2.20元

## 序 言

近三四年來，電機電器的製造工業，發展很快。在電氣機器製造裏，絕緣材料的性能好壞及絕緣方法是否適當，是很重要的事，因此，在使用絕緣材料之前，必須確知其各種屬性；而成品出廠之前，亦應詳加試驗，判別其是否符合一定的規格。在此情形下，那麼很自然地，許多從事絕緣材料及電氣機器製造的工程師及技術員們，就需要知道一系列的絕緣材料及電氣機器的試驗方法。

電廠及各企業設備，為防止發生事故起見，近來亦實行定期檢修制度，在此也要求工作人員們能掌握某些試驗絕緣情況的方法，

關於試驗絕緣材料及電機電器絕緣性能的方法，國內至今尚無專書介紹。其他參考資料，亦不易得。因此，對於許多工作人員的要求，不能滿足。劉紹峻先生曾在電器製造廠裏工作過，感到有此需要，所以劉先生於授課之餘，即從事收集此項資料，近已編寫成書。我想此書出版後，一定很可以滿足許多工作人員的要求，對於電氣事業的發展，有很大的幫助。

再者，電工材料及高電壓工程，現已為許多電氣專業的必修課程，劉先生此書，作為上兩門課的參考讀物，也是非常相宜的。

朱木美於華中工學院

1954年元月十八日

# 目 錄

## 序 言

## 第一編 高壓試驗設備

### 第一章 高壓電源..... 1—33

前言.....	1	(1.7)高頻電源.....	16
(1.1)電源種類.....	1	(1.8)突波的波形.....	21
(1.2)低頻高壓試驗變壓器.....	2	(1.9)電容量的放電.....	22
(1.3)變壓器的累接.....	4	(1.10)突波發電機的原理.....	27
(1.4)電源的容量.....	7	(1.11)突波發電機的幾種充電放電的 實用線路.....	28
(1.5)電壓的調節.....	8	(1.12)突波發電機的電壓.....	32
(1.6)高壓直流電源.....	12		

### 第二章 高電壓的量度.....34—61

前言.....	34	(2.6)離子風電壓計.....	53
(2.1)高電壓計的種類.....	34	(2.7)利用電子管上的柵壓控制來量 度高壓.....	54
(2.2)火花隙.....	35	(2.8)利用氬氣燈的峯值電壓表.....	57
(2.3)靜電電壓計.....	45	(2.9)其他量度突波的方法.....	57
(2.4)利用電暈現象來量度高壓.....	50	(2.10)利用互感器來量度高壓.....	60
(2.5)利用標準電容器上的充電電流 來量高壓.....	51		

### 第三章 示波器與分壓器.....62—89

前言.....	62	(3.5)電子注的隔斷控制.....	69
(3.1)陰極射線管概說.....	62	(3.6)高速冷陰極射線管.....	70
(3.2)射線管的聚焦控制.....	63	(3.7)複演陰極射線管示波器的控制 線路.....	73
(3.3)充氣射線管與真空射線管的比 較.....	66	(3.8)瞬時不複演陰極射線管示波器 的控制線路.....	78
(3.4)電子注的偏轉控制.....	67		

(3.9)電阻式分壓器.....81

(3.10)電容式分壓器.....82

(3.11)阻抗配合用於突波量度中的分壓器.....84

## 第四章 電容器、電阻器、檢流計與試驗室的裝置.....90—109

前言.....90

(4.1)護衛環與屏蔽.....90

(4.2)用在分壓器上與突波發電機上的高壓電容器.....92

(4.3)試驗上用的高壓電容器.....95

(4.4)高壓電阻器.....98

(4.5)轉圈式檢流計.....100

(4.6)衝擊檢流計.....102

(4.7)亞爾通分流器.....103

(4.8)振盪式檢流計.....104

(4.9)高壓試驗室的裝置.....105

## 第二編 絕緣材料的性質與試驗

概 說.....111—112

## 第五章 極化與介質常數.....113—138

前言.....113

(5.1)絕緣質與介質.....113

(5.2)介質常數的定義.....114

(5.3)位移與極化.....115

(5.4)極化學說與極化種類.....119

(5.5)影響極化及介質常數的因素.....126

.....126

(5.6)氣體的介質常數.....129

(5.7)液體的介質常數.....131

(5.8)固體的介質常數.....133

(5.9)介質常數在應用上的意義.....136

## 第六章 絕緣電阻.....139—162

前言.....139

(6.1)吸收現象.....139

(6.2)體積電阻與表面電阻.....141

(6.3)電離子性的導電.....143

(6.4)氣體的導電係數與絕緣電阻.....145

(6.5)液體的導電係數與絕緣電阻.....146

.....146

(6.6)固體的導電係數與絕緣電阻.....147

(6.7)固體介質的表面電阻.....155

(6.8)絕緣電阻在應用上的重要性.....158

## 第七章 絕緣電阻的量度.....163—187

前言	163
(7.1) 量度絕緣電阻時記讀數的時間	163
(7.2) 用高電阻電壓表量度絕緣電阻法	164
(7.3) 用檢流計直接指示絕緣電阻法	165
(7.4) 用失去電荷的方法量度絕緣	

電阻	167
(7.5) 利用真空管電壓計來量度絕緣電阻	171
(7.6) 試品的裝置與量度時應注意的事項	171
(7.7) 液體材料絕緣電阻的量度	178
(7.8) 幾種便攜式的絕緣電阻量度器	182

## 第八章 介質損失 ..... 188—215

前言	188
(8.1) 吸收現象與介質損失	188
(8.2) 代表介質常數與介質損失的等值線路	191
(8.3) 用複數來代表介質損失與介質常數	195

(8.4) 影響介質損失的各種因素	196
(8.5) 氣體的介質損失	200
(8.6) 液體的介質損失	202
(8.7) 固體的介質損失	204
(8.8) 介質損失在應用上的意義	212

## 第九章 介質常數與介質損失的量度 ..... 216—258

前言	216
(9.1) 介質常數的量度	216
(9.2) 用動方式瓦特表量度介質損失法	221
(9.3) 用靜電式瓦特表量度介質損失法	225
(9.4) 用卡熱表量度介質損失法	226
(9.5) 用陰極射線管示波器量度介質損失法	231
(9.6) 關於高壓電容電橋的一般討	

論	237
(9.7) 許令電橋	238
(9.8) 亞特金生電橋	242
(9.9) 高頻共振量度介質電容量與介質損失的方法	243
(9.10) 介質滯迴曲線的量度	248
(9.11) 固體材料介質損失的量度	252
(9.12) 液體材料介質損失的量度	253
(9.13) 氣體介質損失的量度	256

## 第十章 絕緣材料的介質強度 ..... 259—295

前言	259
(10.1) 氣體的打穿現象與學說	259

(10.2) 影響氣體介質強度的因素	261
(10.3) 液體的打穿現象與學說	267

(10.4) 影響液體介質強度的因素... 268  
 (10.5) 常用的幾種氣體液體的絕緣  
 強度..... 276  
 (10.6) 固體絕緣材料的打穿現象與

學說..... 277  
 (10.7) 影響固體絕緣強度的因素... 282  
 (10.8) 多種絕緣材料串聯使用時的  
 介質強度..... 293

第十一章 低頻電壓下的打穿、耐壓與飛弧試驗 ..... 296—325

前言..... 296  
 (11.1) 試驗方法..... 296  
 (11.2) 固體絕緣材料的試品與電極  
 的裝置..... 299  
 (11.3) 均勻電場的獲得與邊緣作用  
 的消除..... 302  
 (11.4) 試驗品的預先處理..... 306

(11.5) 硬膠木的試驗規範..... 307  
 (11.6) 液體絕緣油的打穿試驗..... 308  
 (11.7) 試驗結果的報告..... 313  
 (11.8) 氣體的打穿試驗..... 314  
 (11.9) 瓷絕緣器的打穿與飛弧試驗  
 ..... 317

第十二章 突波試驗 ..... 326—352

前言..... 326  
 (12.1) 關於突波的幾個名詞..... 326  
 (12.2) 突波強度試驗中固體試品與  
 電極之裝置..... 328  
 (12.3) 固體介質的突波強度試驗... 334  
 (12.4) 液體與氣體的突波強度試驗

..... 338  
 (12.5) 絕緣器與火花隙的臨界飛弧  
 電壓試驗..... 342  
 (12.6) 飛弧電壓的電壓時間曲線... 344  
 (12.7) 電壓升高率與飛弧電壓..... 347  
 (12.8) 試驗結果的校正..... 348

第十三章 其他電工試驗與其試驗儀器 ..... 353—376

前言..... 353  
 (13.1) 空隙內絕緣強度恢復速度的  
 試驗..... 353  
 (13.2) 液體材料打穿前電流的量度  
 ..... 354  
 (13.3) 指示游離作用開始的設備... 357  
 (13.4) 快速記錄的交流電橋..... 362  
 (13.5) 絕緣材料的抗電火花性與抗

電弧性..... 367  
 (13.6) 絕緣器的特種電工試驗與量  
 度..... 369  
 (13.7) 石材板面金屬脈絡的測定與  
 雲母品質的火花試驗法..... 371  
 (13.8) 在高溫高濕中絕緣材料對金  
 屬的腐蝕作用..... 373



#### 第十四章 絕緣材料的化學物理機械性質.....377—397

前言.....	377	(14.4)液體絕緣材料的化學性質...	387
(14.1)固體絕緣材料的化學性質...	377	(14.5)液體絕緣材料的物理性質...	390
(14.2)固體絕緣材料的熱性質.....	381	(14.6)液體絕緣材料的熱性質.....	392
(14.3)固體絕緣材料的機械性質及 其他性質.....	385	(14.7)氣體絕緣材料的化學物理性 質.....	394

#### 第十五章 絕緣材料的耐熱性能與壽命.....398—424

前言.....	398	(15.6)A 級材料的壽命試驗(一)...	404
(15.1)固體絕緣材料的分級及其最 高使用溫度.....	398	(15.7)A 級材料的壽命試驗(二)...	407
(15.2)絕緣材料在實用中損壞的情 形.....	398	(15.8)A 級材料的壽命試驗(三)...	409
(15.3)纖維材料的機械壽命的試驗 .....	400	(15.9)B 級材料的壽命與壽命試驗 .....	411
(15.4)塑脂與絕緣漆膜的熱壽命試 驗.....	402	(15.10)H 級材料的壽命與壽命試驗 .....	414
(15.5)A 級材料的熱壽命與絕緣電 阻.....	402	(15.11)關於絕緣材料分級標準的討 論.....	415
		(15.12)礦物油的衰老.....	417

# 第一編

## 高壓試驗設備

### 第一章 高壓電源

#### 前言

絕緣材料的試驗，是高壓試驗的一部份；故在講材料的試驗方法之先，對於高壓試驗設備，應有初步的了解。本章所介紹的各種高壓電源，不只限用於絕緣材料的試驗上，亦可用於一般高壓實驗上。

#### (1.1) 電源種類

作高壓絕緣試驗的電源，以其頻率與波形分，可有下列數種：(1)低頻交流，(2)高頻交流，(3)直流，(4)突波。這幾種電源，在應用上，雖各有不同；但在絕緣材料的研究與試驗上，都是要用的。

低頻交流電源的頻率，為 50 週波或 60 週波。其電壓為 2—3 千伏者，多用於電器的正規絕緣試驗；電壓為 50 千伏者，多用於一般絕緣材料的絕緣強度及介質損失試驗。試驗變壓器和各種絕緣瓷器的絕緣性質時，約需電壓 15 萬伏；而試驗懸式絕緣串，以及作他種研究工作時，則電源電壓，有時要高到 150 萬伏。一般地說，實驗室的電壓是越高越好；不過選用電壓時，還要考慮到設備費的問題。

直流電源主要是用來試驗電纜裝置後的絕緣性質的。在這種時候，電纜很長，電容量大。如用交流電源來作試驗，則電源設備的容量就要很大。用直流時，因為沒有電容性電流；故所需電源容量要小的多，使用起來也方便些。直流電源也用在絕緣材料的研究試驗中。

高頻電源主要是用來試驗電訊上用的絕緣器材的。因為在電源頻

率變高後，材料的絕緣強度及介質損失等性質，都可能發生變化；故有時在低頻試驗中，絕緣性質很好的材料，用在高頻電器上時，其性能就不能達到低頻試驗的標準。其次，在絕緣材料性質的研究中，高頻電源也是很重要的。

突波電源是用來研究材料對於突波電壓的絕緣性質的。一般電器，均有受閃電襲擊的可能，閃電就是一種自然發生的突波。爲了試驗研究電器及材料對閃電的絕緣性，爲了研究試驗閃電的性質及其破壞能力，常用一種人製的突波發電機，產生和閃電性質相近的突波，作爲試驗電源。其次在許多高壓線路中，由於開關的操作，也可以產生突波，使電路上的瞬時電壓，高出於正常使用電壓數倍。故突波電壓下的絕緣性質，對於電工絕緣材料來說，是相當重要的。

## (1.2) 低頻高壓試驗變壓器

此種變壓器，爲高壓試驗設備中的主要部份。由於過去關於高壓方面的研究，以及一些變壓器的損壞與使用經驗的累積，提高了高壓變壓器方面的設計理論與製造技術：知道了如何使電位梯度均勻分佈，如何在油中消滅電暈，如何阻止表面的爬電，以及如何使端部線圈能抵抗突波的襲擊等等。早先設計的變壓器是使高壓線圈的中心點接地。這樣在使用時，高壓線圈的兩個出線頭  $a$ 、 $b$  (圖 1.1) 對地來說，有相等的電壓；因之對於油箱及鐵心等說，出線頭僅需要相當於變壓器額定電壓的一半的絕緣能力。用這樣設計的變壓器爲試驗電源時，必須使試品完全與地絕緣，需要另外一套使試品絕緣的設備。這種接線方法，與高壓電器在實用時的情形不相符合，故目前已不用這樣的變壓器。現在，在高壓試驗中，試驗品的一端，都是接地的，因之試驗變壓器的一端也應該接地；故變壓器高壓線圈的另一端，就需要有相當於試驗電壓的絕

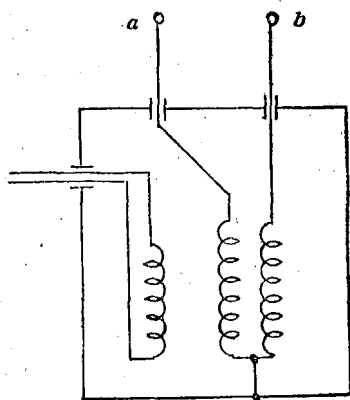


圖 1·1 試驗變壓器，次級線圈中點接地

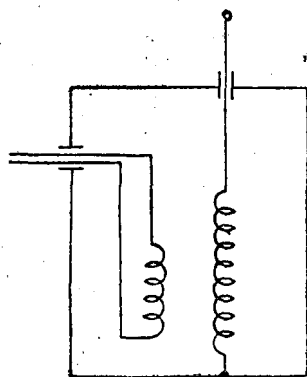


圖 1·2 試驗變壓器，次級線圈一端接地

緣力量(圖 1·2)。在過去幾十年中，這種一端的絕緣電壓，隨着製造技術的進步，一步一步地加高。現在，在某些國家，一只單獨變壓器的電壓，已可達一百萬伏，其容量可到 1000 千伏安。但變壓器的製造費用與維持費用，約言之，是與電壓的三次乘方成比例的，即電源電壓增加一倍，則費用要增加八倍；故電壓太高了，製成一隻單獨的變壓器，就費用來說，是不合算的。目前單隻變壓器的最高電壓，在實例中僅約為 50 萬伏。

下面略述上海電機廠出品 10 萬伏高壓試驗變壓器的構造要點：

變壓器的變壓線圈，採用費歇爾式的絕緣，一端接地。各層線圈繞成同心圓筒，層間絕緣因電壓漸低而漸次低減，並使層與層間的電容量盡量保持相同；因之當突波加於高壓端時，不致因電壓分佈不均勻，而使絕緣遭受損壞。爲了使線圈的真空處理有完美的效果，層間均有

油槽，使空氣不致停留於層間以增加線圈的絕緣能力，並消滅電暈現象。

在此變壓器中，尚有數處有消滅電暈現象的設備：(1)高壓線圈，(2)高壓線頭，(3)高壓接線。高壓線圈的內層及外層，用內外電屏蔽各一隻，使可能來自外方的突波電壓，分佈均勻；並在外電屏的兩邊，加半導體的滅暈材料，使線圈上電位梯度最高的地方能避免放電。同心線層間，均有絕緣紙及槽。二者配合適當，使不致因油槽過小，將電壓大部集中在油槽下部的薄層上而致發生電暈。高壓出線頭至瓷瓶下端，須包紮充份的絕緣帶及紙。引線的直徑要大，使其表面的電位梯度減少。在瓷瓶導桿下端裝有銅球，以減少電暈及電橋放電。導桿上端裝有滅暈罩。高壓接線，均用紫銅管。在線上，要避免能產生過高的電位梯度的銳角、毛頭，及半徑甚小的圓角等。此變壓器之電壓，主要地是受了絕緣出線套絕緣能力的限制。假使能將出線套的絕緣電壓提高，則變壓器的電壓，還可能要高些。

### (1.3) 變壓器的累接

當試驗電壓過高時，若製成單獨變壓器來供給電源，則設備費太貴；故高壓低頻電源中，多採用累接線路，即將電壓較低的幾個變壓器累接，以得到所需要的試驗電壓。這種辦法，可使單隻變壓器的出線電壓減低，減少設備及維持費用。同時尚有一個好處，即在某隻變壓器損壞後，不會損壞全體。未受損的變壓器，在其容許的容量內，尚可設法利用。下面介紹幾種累接線路。

圖 1.3 為高壓變壓器的一種累接線路。在此線路中，每隻變壓器的出線與變壓器鐵壳間的絕緣，為總電壓的三分之一。第二隻變壓器與第三隻鐵壳對地的絕緣電壓，各為總電壓的三分之一及三分之二。

爲了供給第二隻及第三隻變壓器的初級線圈，尚須加用數隻電壓轉換率爲 1:1 的變壓器。這些變壓器的出線與壳間，以及壳與地間，均須有適當的絕緣能力。在這種線路中，因爲須多用幾隻供給第二隻及第三隻變壓器初級線圈的變壓器，以致費用太大，採用者不多。

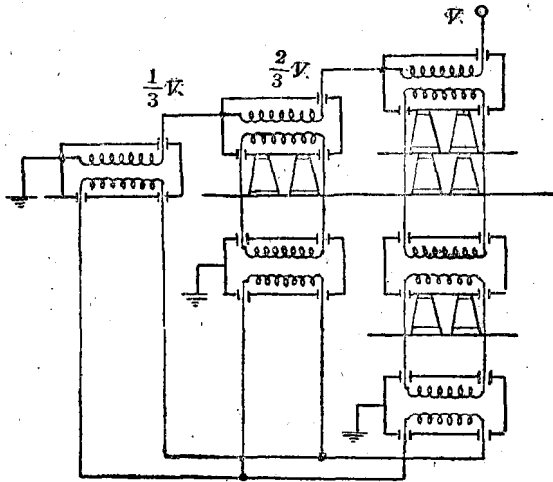


圖 1.3 高壓試驗變壓器累接法之一

圖 1.4 示另一種高壓變壓器的累接線路，這是應用較廣的一種線路。如圖第二隻變壓器及第三隻變壓器的初級電源，各由其前面一隻

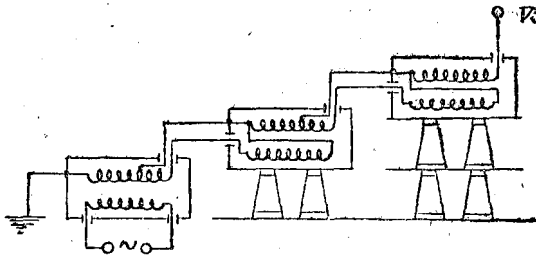


圖 1.4 高壓試驗變壓器累接法之二

變壓器的高壓線圈的一部份供給，再將各高壓線圈串聯。這樣每隻變壓器中，高壓出線與壳間的絕緣電壓各為三分之一的總電壓；第二隻變壓器與第三隻變壓器的壳及鐵心對地的絕緣，則各為總電壓的三分之一及三分之二。

上海電機廠所製之 225 千伏的高壓試驗電源設備，就是採用圖 1.4 的累接線路的。在該套設備中，包括有 75 千伏的變壓器三隻，其容量各為 50、30 及 15 千伏安，都是油浸自冷式。30 千伏安變壓器的箱底，加裝累接絕緣瓷座，與地間的絕緣電壓為 75 千伏；15 千伏安變壓器的箱底，亦需加用絕緣瓷座，其與地面間的絕緣電壓為 150 千伏。這三隻變壓器累接後，總電壓為 225 千伏。

圖 1.5 所示之累接線路中的變壓器均為空氣絕緣。在這種線路中，每隻變壓器的鐵心，均須與地絕緣。但高壓線圈與鐵心間之絕緣，僅為總電壓的六分之一。每隻變壓器中，在其高壓線圈的一半處，皆與鐵心連接。這種線路的電壓，可達到一百萬伏。在這種線路中，沒有鐵壳及出線的麻煩，容易修理；但所佔的地位甚大，價值較高，僅能用在乾燥的環境中。

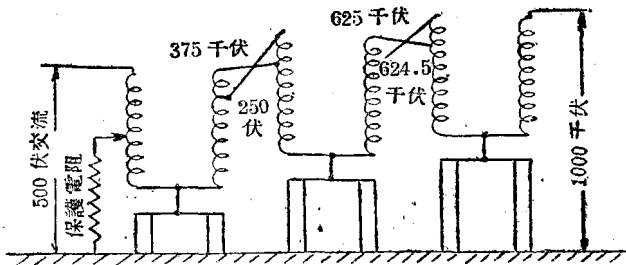


圖 1.5 高壓試驗變壓器累接法之三

最後尚有一種線路，係採用三隻變壓器與三隻發電機，由各發電機分別供給各變壓器初級線圈的電源。發電機由電動機驅動。電動機與

發電機的驅動連接之間，須有足夠之高壓絕緣。每隻變壓器的線圈在中點均與鐵心聯接；因之出線頭至鐵心間的絕緣，僅為每隻變壓器額定電壓的一半，即為總電壓的六分之一。圖 1.6 示此種裝置的大概情形。

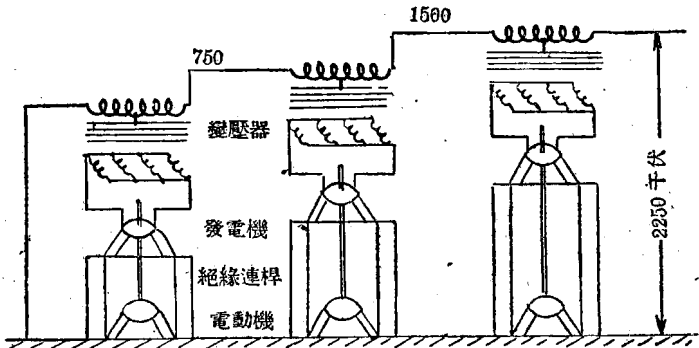


圖 1.6 用發電機供給試驗變壓器的電源時的高壓累接法

因為整個的裝置，均在空氣之中；故所佔地位大，設備費高。這種線路的容量，為各單獨電源的容量之和。其主要優點，是可以得到較完善的電壓調變〔參考(1.5)節第一段〕；其缺點是，在使用的情形下，很難保持電源電壓及頻率為一定數值。

#### (1.4) 電源的容量

絕緣材料的試驗結果，和所用的電源容量有關。例如在絕緣器的試驗中，假若電源的電容量大，則在打穿後，可使試品產生嚴重的損壞；假若電源的容量甚小，即令有甚高的試驗電壓，在打穿之後，對試驗品亦無顯著之效果。選擇電源容量時，應考慮到電壓的數值及試驗品的性質。一般地說，用 50 萬伏的電壓時，其容量約為 250 千伏安。當電源電壓變化時，其容量則以平方的關係增加或減低；因之在 100 萬伏時，容量應為 1000 千伏安，在 10 萬伏時，則容量為 10 千伏安。



照德國 VDE 規範的規定，試驗絕緣器的電源容量，最小應為 10 千伏安；試驗變壓器與油開關的最小電源容量，應為 250 伏安。表 1.1 示在各種不同的試驗目的中，所應當用的各種電源容量與電源電壓。

表 1.1 各種高壓試驗的電源容量與電源電壓

試 驗 目 的	近似電源容量 (千伏安)	電 源 電 壓 (千伏)
對電動機與開關等的一般高壓試驗	小	2—3
絕緣試驗	10—20	50
電纜的經常試驗	50	10—30
高壓變壓器、瓷絕緣器及其他研究試驗	20—50	100—200
研究與懸式絕緣串的試驗	每一千伏有 $1/2-1$ 千伏安	500—2000
高壓電纜試驗	100—500	100—500

除了變壓器的正常容量外，試驗設備的短路容量也應該相當的大；否則在試驗時容易產生電壓的變化與波形的畸變。假使變壓器是由其單獨的發電機供給的(圖 1.6)，則發電機應有足夠的短路容量。假使變壓器是聯接在強電力的供電系統上的，則其短路容量的數值多半是足夠的，用不着詳細考慮。

### (1.5) 電壓的調節

電壓的調節，一般需要其可能變化的範圍大，並需要在電源電壓接近試驗品之打穿強度或飛弧電壓時，應使電源有緩慢而均勻的電壓變化。調節高壓試驗變壓器的方法，一般都是變更其初級線圈的電壓，以收調節次級高壓之效。其方法約有下列幾種：

1. 調節交流發電機的磁場電流 在供給電源為一專用的交流發電機時，可用此法來調節電壓。交流發電機的波形，在無載時應是正弦