

高压电器文集

GAOYADIANQI WENJI

3

1965

沈阳高压开关厂技术情报组编

目 录

产品设计与工艺

- 60仟伏电容器开关.....(1)
- 电磁式空气断路器.....(19)
- 电容套管设计及有关参数的确定.....(15)
- 銀—鎢合金中銀的回收.....(22)

譯 文

- 空气断路器的設計.....(24)
- 同步式一周波断路器.....(32)
- 高压大容量断路器的单元試驗.....(39)
- 德意志民主共和国大容量試驗室.....(42)
- 高压断路器設計和試驗中的若干新問題.....(50)
- 高压断路器.....(59)
- 直流电磁铁尺寸的最佳关系.....(63)
- 用模拟电子计算机計算直流磁路.....(66)
- 塑性变形若干原理的应用.....(69)
- 美国西屋公司新建成的超高压試驗中心.....(76)

消息报导

- DW 3—110 型油断路器灭弧装置缺陷的消除.....(41)
- SF₆ 特性研究及 SF₆ 断路器文献索引.....(77)

60 仟 伏 电 容 器 开 关*

蔡君偉 罗永树

引 言

为了提高电力系统的功率因数，维持正常的电压水平，国内外的电力系统中都开始或普遍采用并联的静电容器作为无功源。如所周知，为改变无功源输出的无功功率，此时必须装设一与其相串联的开关，通过开关的分合操作来达到改变无功功率的目的。通常在高峰负荷及系统电压降低时，需闭合此开关以接入电容器；而在低负荷及电压升高时，必须分断此开关以切除电容器。就这样，随系统情况的变化，通过开关的相应操作改变了无功功率的输出，从而大大提高了系统的功率因数和达到了调压的目的。

按照开关的这种特殊职能，我们将它命名为“电容器开关”。显然，这种开关切合的电流很小，仅为数拾乃至数百安的容性电流，但国内外的一些试验都表明，若用普通开关进行这一操作时，会出现二种严重危及系统和开关本身的异常现象，这些现象是：

1. 在切除电容器时，因开关的多次重燃和再击穿**，会产生极高的过电压，以致造成系统绝缘闪络和击穿。
2. 在接入电容器组或切除电容器组（因开关重燃和再击穿）时均会出现数值和频率皆高的涌流，这一电流会损坏油开关的灭弧装置和系统设备。

为克服这些异常现象，保证开关安全操作电容器，以及从而使电力系统可以广泛采用并联电容器，必须采用特殊的开关或在普通开关上采取特殊措施。

我厂最近试制成功的60千伏电容器开关就是针对用户的迫切需要而进行的。开关的参数

为：

额定电压	60千伏
被操作电容器的最大容量	7500千乏
五秒钟热稳定电流	7千安
极限通过电流（幅值）	15千安

本文将叙述这一开关的结构、工作原理和试验结果，此外为了便于叙述，我们还必须先谈一谈操作电容器组时的异常现象和克服这些现象可采取的措施。

操作电容器组时的异常现象

一、过电压

过电压的数值与很多因素有关，如：电源和电容器组中心点的接地方式；开关的介质恢复强度（即开关在切除电容器组时产生的重燃和再击穿次数）等。我们来分析电源和电容器组中心点均直接接地的网路（图1）。显然，该网路可用图2单相电路来分析，因为其中任一相发生的过程与其他二相无关。

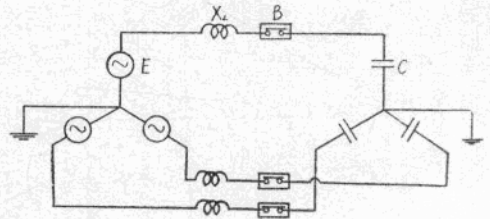


图1 电源和电容器组中心点均直接接地的三相网路
*L—线路电感；B—开关；C—电容器组；E—电源电压。

*本开关的设计、试验是在清华大学电机系高压教研组、东北电管局、锦州电业局大力合作下进行的，我们在这里致谢。

**重燃是指电流过零后小于 $\frac{1}{4}$ 周内，触头间重新出现电流。再击穿是指电流过零后等于或大于 $\frac{1}{4}$ 周的情况下，触头间重新出现电流。

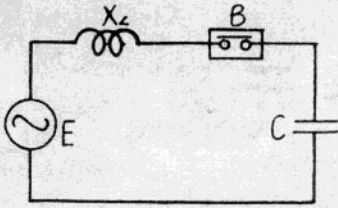


图2 与图1等值的单相电路
 X_c —线路电抗; B —开关; C —电容器组; E —电源电压。

图2电路近于容性, 其中电流超前电压 90° 。设开关在电流过零时切断电流, 而此时正好相应于电源电压幅值(图3, $t = \frac{1}{2}$ 周时), 故电容 C , 亦即开关的一个端子上将保持这一电压, 这可由图3清楚地看出。但开关另一端并非如此, 它随电源电压作正弦变化(图3中虚线), 因此在 $t = \frac{3}{4}$ 周时断口间出现一数值为两倍相电压幅值($U_{\phi m}$)的恢复电压, 若断口无法耐受这一电压, 则产生击穿。此时电容器重新与电源联接, 并迫使电容器上电压改变为电源电压, 但因电路中电感的存在, 故出现一振幅为 $2U_{\phi m}$ 的振荡, 过电压可达 $3U_{\phi m}$ (图3中 $t = \frac{3}{4}$ 周时)。

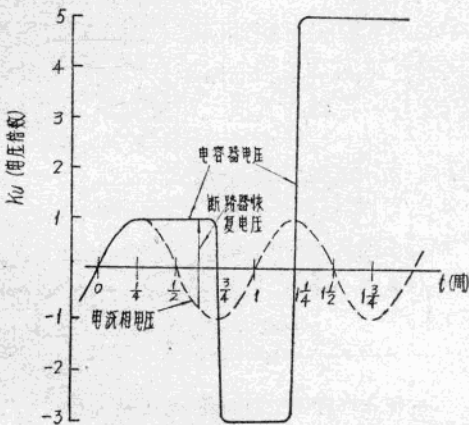


图3 中心点直接接地系统中开关上的恢复电压和再击穿所引起的过电压(图中 K_u 为相对于电源相电压幅值的电压倍数)

若在电容器上振荡电压达幅值时, 因过渡状态的高频电流抵零而开关重新开断, 则电容器上保持了电压 $3U_{\phi m}$, 与前同, 因电源电压

继续作正弦变化, 断口间出现 $4U_{\phi m}$ 的电压($t = 1\frac{1}{2}$ 周)。若此时又产生再击穿, 则过电压达 $5U_{\phi m}$ 。可见当再击穿次数增加时, 过电压不断上升, 可达7、9……倍 $U_{\phi m}$ 。当然, 这些讨论是理想化了, 实际上再击穿可能在较低的恢复电压下发生, 另外, 电路中多少存在电阻, 故实际上的过电压肯定要低些。

但对中心点绝缘系统来说, 情况有异。此时三相电路不能简化为单相电路, 因电容器中心点在开关分断过程中并不恒保持为地电位, 而是变化的。我们不准在这里阐述其中发生的过程(可参阅文2), 但需指出一点, 即中心点绝缘系统中产生的恢复电压和过电压通常要比中心点接地系统为高。

从上叙述可见, 不管中心点状态如何, 当开关的介质强度不足而出现重燃或再击穿时, 电源和电容器侧会出现甚高的恢复电压, 重燃或再击穿次数愈多, 则恢复电压和过电压愈高。

二、涌流

先说明操作单组电容器的情况(参阅图2), 然后再叙述操作两组电容器并联的情况(图4)。

对于图2电路, 若 C 二端无电荷, 则合闸电流仅受到线路及电源阻抗的限制。当合闸瞬间电源电压正好为幅值, 涌流幅值可用下式计算:

$$I_m = I_0 \left(1 + \sqrt{\frac{W_k}{P_c}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

式中

- I_0 ——稳态电流幅值;
- W_k ——电容器进线端短路时的短路功率(千伏安);
- P_c ——电容器容量(千乏)。

涌流频率为:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{W_k}{P_c}} \dots \dots \dots (2)$$

式中 f_0 为工频。

若电容 C 上预先已有全电荷, 且与电源极性相反, 则合闸(亦相当于开断时发生再击

穿!) 涌流將較式(1)計算值大一倍。試驗表明,操作單組電容器時的涌流 $I_m = (5 \sim 15)I_0$, 故對開關無甚危害。

克服異常現象的措施

通常可採取下列措施。

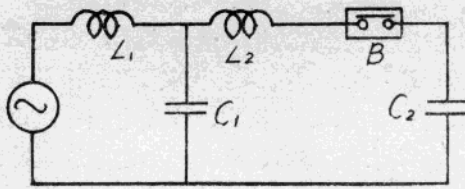


圖4 用開關B操作並聯的電容器組 (C_1 已投入, 用B操作 C_2)

圖4 電路中的情況則截然不同。此時 C_1 已運行, 而通過開關B的操作投入 C_2 , 由於引線電感 L_2 極小, 故涌流將極大。可用下式計算 I_m :

$$I_m = \sqrt{2}E \sqrt{\frac{C_t}{L_2}} \dots\dots\dots (3)$$

式中 L_2 ——電容器組間的引線電感, 亨利,
 C_t ——電路總電容, 法拉

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

涌流頻率為

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_t L_2}} \dots\dots\dots (4)$$

與前同, 式(3) 僅用於 C_2 未充電時, 如已充有相反極性的全電荷, 則涌流應高一倍。試驗表明, 並聯電容器組時涌流峰值可達 $(20 \sim 250)I_0$, 頻率达10000赫, 但其衰減甚快, 通常在一個工頻周波內即降低到極低值。

若斷路器開斷時發生再击穿(相當於閉合預充相反極性全電荷的 C_2), 則涌流可能使油斷路器的滅弧裝置損壞。因其頻率高而幅值大, 相當於一種在弧區內的爆炸性能量釋放, 而油慣性頗大, 於是此能量釋放即在滅弧裝置內引起極高壓力, 從而使之破壞。此外, 涌流引起的電動力, 和對控制回路的影響亦都需考慮的。

1. 採用真空開關 此種開關的優點在於介質強度極高, 故可完全免除再击穿和由此產生的涌流。至於合閘時的涌流對真空開關威脅也不大, 因它的合閘速度大, 介質強度高, 故在預击穿發生前觸頭可已閉合; 此外, 即使有爆炸性的能量釋放, 真空亦不會傳遞能量, 故不會對器壁造成機械負荷。最後, 關於涌流產生的電動力肯定可用提高機械強度等措施解決。因此可以確信, 真空開關是一種性能極為良好的電容器開關。

2. 採用SF₆開關 最近有不少文章(文5、6) 報導了用SF₆開關操作電容器組、電纜的試驗, 因SF₆的熄弧性能好, 介質強度高, 故都得出了良好的效果。

3. 採用具有機械油吹的油斷路器 即在開斷時借助機械力量將新鮮油液壓入弧道, 以提高介質強度, 從而免除重燃和再击穿。可惜這種結構無法免除合閘時的涌流。

4. 採用帶並聯電阻的二步操作油開關 其工作原理如圖5 示。當觸頭分開時, 先出現主斷口, 此時主斷口與電阻 R_B 相並聯, 而動觸頭繼續向下運動時, 主斷口的電弧熄滅, 此為第一步開斷。由於此時 R_B 串入電路, 故流過輔斷口的乃是數值較前為低的兼有電容和電阻性的電流, 最後由輔斷口切斷電路, 此為第二步開斷。合閘時的程序恰相反, 先接通輔斷口, 從而串入 R_B , 然後再接通主斷口, 將 R_B 短接。

我們來解釋並聯電阻 R_B 的作用。由圖6 可清楚地看出, 當合閘時, 輔觸頭(即圖6 輔斷口)先閉合, 因串入 R_B 故既限制了合閘電流, 亦限制了過電壓。此後當主觸頭閉合時, 通過其上的電流及過電壓均低, 因 C_2 已通過 R_B 從電源接受了一定數量的電荷, 亦即 C_2 端子上的電壓已與電源電壓相靠近。

在分開時, 主觸頭先打開, 回路中串

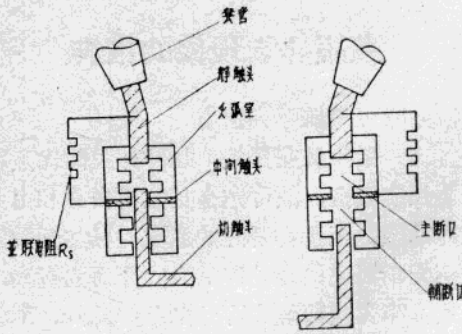


图5 带并联电阻 R_s 的 二步操作开关的工作原理图

左—第一步开断；右—第二步开断。

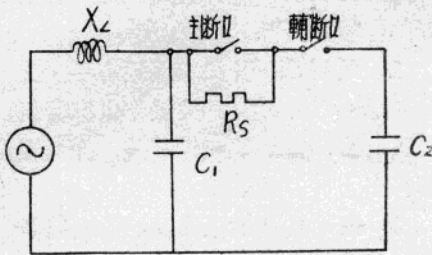


图6 二步操作开关的工作电路图

入 R_s ，故回路并非突然开断， C_2 尚可通 R_s 泄放电荷，因此降低了主触头的恢复电压 U_{B1} ，便于其开断， R_s 愈小， U_{B1} 愈低，主触头愈易开断。因 U_{B1} 降低了，即使发生重燃或再击穿，过电压 U_{n1} 也来得低， R_s 愈小， U_{n1} 愈低。随后辅触头打开，因已接入 R_s ，故电路由纯容性转为电容与电阻的结合，亦即电流过零时电源电压不再为最大值，故辅触头上恢复电压 U_{B2} 降低；另一方面，流过辅触头的电流亦因接入 R_s 而降低，二者均对开断有利，便于辅触头开断。显然，由于 R_s 的存在，即使辅触头发生再击穿，过电压也低，因 R_s 有阻尼作用，同时恢复电压亦已降低的缘故。对辅断口而言， R_s 愈大愈好，因这时限流和阻尼作用亦大。

由上叙述可见，二步操作的开关能解决涌流和过电压的问题，但二步开断所要求的电阻值是不同的，第一步要求低值电阻，第二步要求高值电阻，因此选择一合理的电阻值显得特

别重要。

文8从理论上计算出了中心点绝缘系统中操作电容器组时主断口和辅断口的恢复电压 U_B 、过电压 U_n （一次再击穿）与并联电阻值 R_s 间的关系（图7），其中电压均用电源相电压作为基值的相对值来表示；感抗 X_L 和电阻 R_s 均用容抗 X_C 作为基值的相对值来表示。这里必须调强指出，恢复电压和过电压与比值 R_s/X_C 有关，因此，如已通过试验得出某一容抗 X_C 下的最佳比值 R_s/X_C ，则可据此推得另一容抗下所需电阻值，我们可利用这一见解。

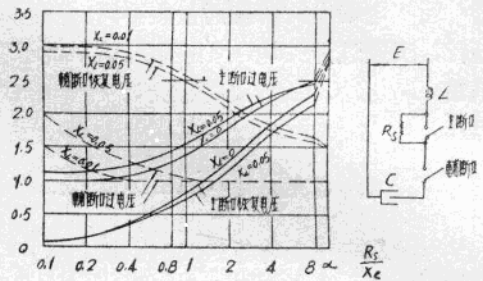


图7 中心点接地系统中操作电容器组时主断口和辅断口的恢复电压 U_B 、过电压 U_n 与并联电阻值 R_s 的关系曲线。

为尽快地制出满足用户需要的电容器开关，通过分析，我们认为在60千伏多油开关（DW1—60型）上加装并联电阻是最适宜的，下面将叙述其结构。

60千伏电容器开关结构叙述

图8为60千伏电容器开关的单相剖视图。除在灭弧室1内加装了中间触头和在每个主断口上装设了一个并联电阻2外，开关的其余部分与DW1—60型多油断路器完全相同。

加装中间触头的灭弧室如图9示，在接近于灭弧室高度的 $\frac{1}{3}$ 处增设了中间触头。由于灭弧室的隔弧片均与原结构通用，故新灭弧室的高度要比原结构高30毫米。中间触头，可绕轴转动，其上有扭力弹簧2，以保证中间触头与动

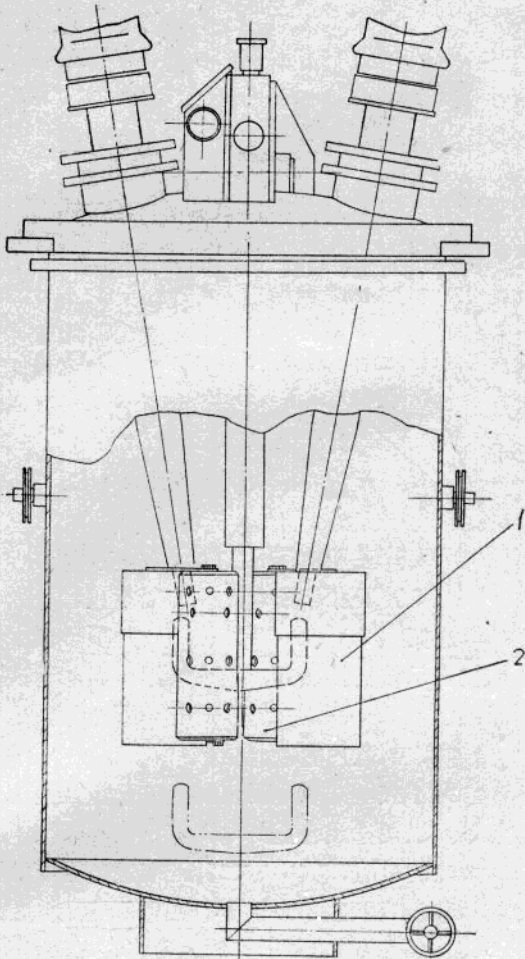


图8 60千伏电容器开关单相剖视图
1—灭弧室；2—并联电阻；3—上支板。

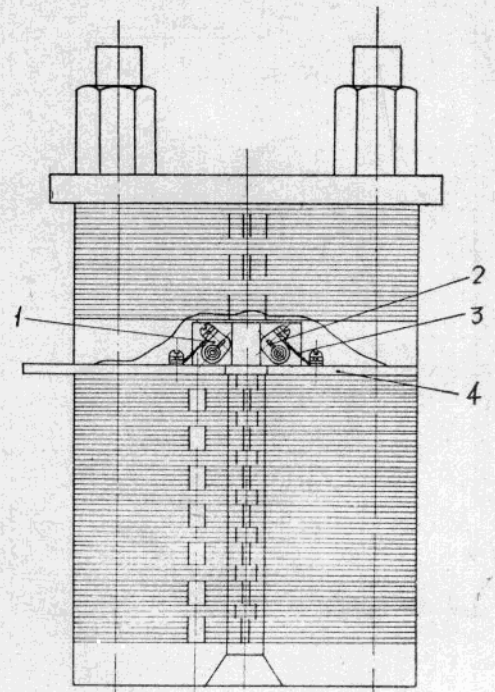


图9 加装中间触头的灭弧室

1—中间触头；2—扭力弹簧；3—导电带；4—底座

触头接触时有适当的接触压力，中间触头借助于导电带3与底座4作电气联结，而底座又通过下支板连至并联电阻。

并联电阻用镍铬合金丝制成，将预先绕成螺旋状小圈的镍铬丝，绕在带有槽的内绝缘筒2上（参阅图10），然后再套以外绝缘筒3，筒3上开有很多圆孔，以便电阻丝通电发热时产生的油蒸气能很快排出。并联电阻之上端通过上支板（图8）与静触头座作机械和电气的联结；下端连至下支板，就这样，电阻被并联于主断口二端。这一结构保证了并联电阻具有良好的机械固定性能。电阻丝的直径亦经仔细选择，保证在较长时间通电后不会损坏，故在实际运行的间断操作时，电阻丝有足够的安全系数。

由上述可见，只须对DW1—60多油断路器稍作改变，就能制成一台60千伏电容器开关，这不仅便于生产制造，也对用户自行改制十分有

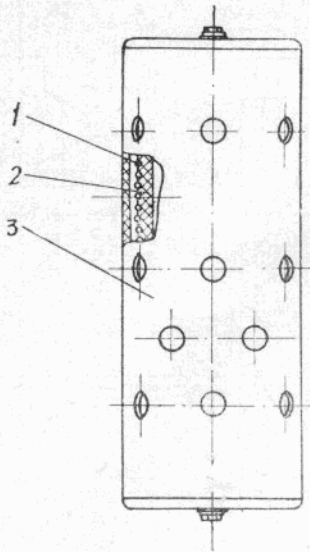


图10 并联电阻器

1—电阻丝；2—内绝缘筒；3—外绝缘筒

利。

試驗結果

一、操作电容器组的网路試驗

在电力部门和兄弟单位的大力协助下，60千伏电容器开关在网路上进行了24次操作电容器组的“合——分”試驗。全部試驗均是成功的，过电压及涌流均很低；并联电阻无任何燒損迹象；触头燒伤亦輕微。

1. 試驗线路接綫和测量的参数

在二种不同的接綫方式下进行了試驗，其单綫图示于图11。二者的区别仅在于接綫方式I带有約100公里长的綫路，而方式II的母綫則直接連至电容器组。为防止試驗时的过电压損伤电力设备，增設了絕緣水平較低的对地和相間保护間隙。

共测量了下列参数：

(1) 母綫对地电压 U_a, U_b, U_c 及相間电压 U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} 。

(2) 电容器端对地电压 U_a', U_b', U_c' 、端子間电压 U_{ka}, U_{kb}, U_{ko} 及其中心点对地电压 U_H 。

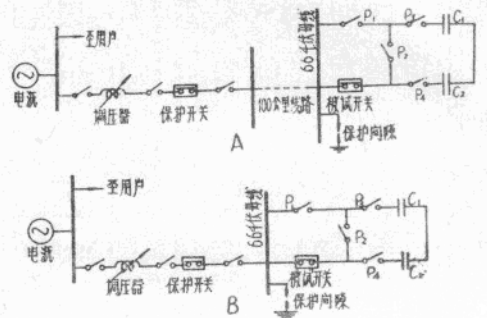


图11 二种試驗线路，接綫方式 I (A) 和接綫方式 II (B)

P—隔离开关； C—电容器组

(3) 开关的触头間恢复电压 U_{Ba}, U_{Bb}, U_{Bc} 。

(4) 三相电流 I_a, I_b, I_c 。

(5) 脱扣綫圈电流及开关行程。

除第(2)、(3)、(4)項参数由机械扫描示波器拍摄外，其余均用电磁式示波器记录。

2. 試驗内容及测量值

为了查明并联电阻值限制过电压及涌流的效果，以便选定合适的电阻值，我們制出了不同数值的电阻，其中有二种阻值进行了試驗。在465欧和767欧下分別作了操作单组容量为7560、4860及2700千乏的試驗；在465欧下还进行了一次两组电容器并联（一组容量为2700千乏的先投入系統，而对容量为4860千乏的另一组进行分合操作）的試驗。除了三次操作的循环分别为“合——8”——分”，“合——4.5”——分”和“合——6”——分”外，其余循环均为“合——180”——分”。投入电容器前母綫电压为65.4~69.5千伏，投入后母綫电压（即切除电容器组时母綫电压）升为67.1~74.2千伏。

各组試驗中的最高测量值见表1。

3. 試驗結果的討論

以下选择最感兴趣的試驗結果加以討論。

(1) 重燃次数与过电压

重燃現象可从恢复电压波形中明显地看出，图12a和b为其典型示波图。

各組試驗中的最高測量值

表 1

操作方式	接綫方式	聯電阻 (歐)	電容量 (千乏)	試驗次數	母綫側過電壓 (倍数)		電容器端子過電壓 (倍数)		恢復電壓 (倍数)		涌流 (倍数)		燃弧時間 (毫秒)		熄弧開距 (毫米)		重燃次數		中位心移 (倍電壓)	備注
					相	間	對地	主	輔	主	輔	主	輔	主	輔	主	輔	主		
切	I	465	7560	3	1.2	1.2	1.0	1.85	0.86	3.27	1.71	40	84	40	163	0	5	0.75	主觸頭發生二次重燃 主觸頭發生一次重燃 “合分”操作	
			4860	3	1.0	1.1	1.2	2.15	0.64	3.20	1.80	28	84	31	163	0	5	0.97		
			2700	3	1.2	1.1	1.17	2.10	0.42	3.24	2.17	28	66	31	129	0	6	1.12		
		7560	2	1.1	1.2	1.2	1.43	1.40	2.60	1.58	52	64	58	119	1	3	0.69			
		4860	3	1.0	1.05	1.1	1.82	0.82	3.10	1.13	78	84	31	163	1	5	0.83			
		2700	3	1.0	1.0	1.22	—	0.57	2.82	1.80	32	68	35	138	0	5	—			
	II	465	4860	2	1.0	1.0	1.0	—	0.65	3.33	1.11	28	72	40	150	0	4	—	其中一次“合分”操作 兩組電容器并聯操作	
			2700	1	1.0	1.0	1.62	—	0.25	1.71	1.50	24	44	27	74	0	4	—		
			4860	2	1.0	1.0	1.04	—	0.65	3.00	2.0	28	66	31	128	0	4	—		
		7560	1	1.0	1.0	1.18	—	0.75	3.14	1.93	48	84	51	163	0	5	—			
		4860	1	1.0	1.0	1.0	—	0.67	2.82	1.50	24	25	27	90	0	4	—			
		4860	1	1.2	1.2	1.62	1.35	2.15	1.40	3.33	1.93	52	84	58	163	1	6	1.12		
合	I	465	7560	3	1.4	1.4	1.4	1.21	—	1.57	0.71	—	—	—	—	—	—	0.697	“合分”操作 其中一次“合分”操作 兩組電容器并聯操作	
			4860	3	1.1	1.1	1.23	1.26	—	2.0	1.17	—	—	—	—	—	—	0.30		
			2700	3	1.2	1.2	1.21	1.0	—	1.27	1.27	—	—	—	—	—	—	0.80		
		7560	2	1.4	1.4	1.32	1.3	—	2.14	0.70	—	—	—	—	—	—	0.41			
		4860	3	1.2	1.4	1.40	1.26	—	2.0	0.90	—	—	—	—	—	—	0.35			
		2700	3	1.0	1.0	1.36	—	—	1.8	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—		
	II	465	4860	2	1.2	1.35	1.0	—	—	1.44	0.78	—	—	—	—	—	—	—	其中一次“合分”操作 兩組電容器并聯操作	
			2700	1	1.0	1.0	1.04	—	—	2.0	1.30	—	—	—	—	—	—	—		
			4860	2	1.0	1.0	1.13	—	—	2.8	1.11	—	—	—	—	—	—	—		
		7560	1	1.1	1.2	1.11	—	—	3.06	0.86	—	—	—	—	—	—	—			
		4860	1	—	—	1.0	—	—	2.0	1.14	—	—	—	—	—	—	—	—		
		4860	1	1.4	1.4	1.4	1.26	—	3.06	1.30	—	—	—	—	—	—	—	0.80		

* 主、輔分別相對於主斷口、輔斷口工作時的數值。

加并联电阻后主触头的重燃次数大大减少, 24次試驗中仅有3次(如图12a)。可以看出, 当 R_s/X_c 增大时, 主触头重燃的可能性增大, 但重燃在母綫側不引起过电压, 在电容器側引起的最高过电压亦低(倍数1.35)。

輔触头重燃次数較多(如图12b), 最多为5~6次。一般地說, R_s/X_c 增大时, 輔触头重燃次数要少一些。但輔触头多次重燃引起的过电压亦不高, 母綫側对地最高为1.2倍, 而电容器側对地因中心点位移最高为2.15倍。試驗表明, 加并联电阻后过电压并无随重燃次数而增长的关系。

必須注意在接入电容器組时, 反而出現較高的过电压, 最高值为1.4倍(图12c)。

(2) 恢复电压

切除电容器組时, 主触头間的恢复电压均低于相电压, 但輔触头較高, 最大可达相电压的3.33倍, 但本开关完全能承受这一电压, 确保电弧熄灭。从图12b中可看出, 恢复电压随重燃次数而逐步升高的有趣現象。

(3) 涌流

从前面的叙述可知, 当操作电容器組, 特别是兩組并联的电容器組时会出現幅值和頻率皆极高的涌流, 但加装并联电阻开关的試驗表明, 涌流值及頻率均低, 接入单組电容器組时的最大涌流为3.06倍(图12d); 而操作兩組并联电容器(先投2700千乏, 再投入4860千乏)时的涌流为2倍, 唯此时頻率較操作单組时为高, 約达2500周。

(4) 主、輔断口的熄弧开距

主断口的熄弧开距在27~58毫米範圍內, 实际可达开距为82毫米, 故尚有足够裕度。一般說来, R_s/X_c 愈大, 主断口熄弧开距愈大。

輔断口的熄弧开距在74~163毫米範圍內, 实际可达开距为275毫米, 故有很大裕度。

从网路試驗中我們可以得出結論, 采用465欧或767欧并联电阻来操作2700~7560千乏的电容器組均是可行的。这相当于 R_s/X_c 在0.286~1.32範圍內变动, 故可认为此一合适的范围。但通盘地考虑一下試驗結果, 看来

465欧电阻的工作情况要好一些, 故最后选定了该电阻值。

由于試驗条件限制, 未能进行10000千乏的試驗, 但从理論上可以預計, 用465欧电阻可完成这一任务, 因此时 $R_s/X_c = 1.07$, 而該值在0.286~1.32的範圍內。

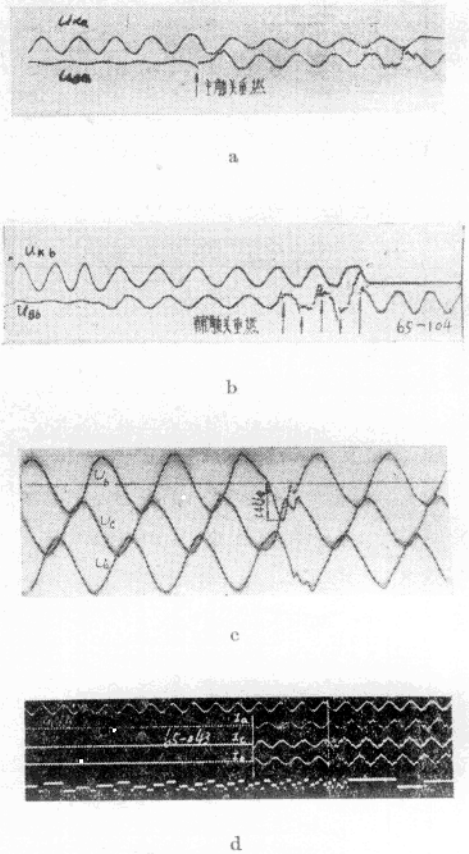


图12 几張典型示波图

- a—表明主触头重燃的恢复电压 (U_{Ba}), $R_s = 767$ 欧, 7560千乏。
- b—表明輔触头多次重燃的恢复电压 (U_{Bb}), $R_s = 465$ 欧, 7560千乏。
- c—投入电容器时母綫側对地过电压 (U_a, U_b, U_c), $R_s = 767$ 欧, 7560千乏。
- d—接入单組电容器組时的涌流 (I_a, I_b, I_c), $R_s = 465$ 欧, 7560千乏。

二、开关的机械强度試驗

在开关无油情况下进行了2050次分合閘操作試驗(其中50次是高电压操作), 此后作了

檢查。檢查表明：并联电阻无断綫及不良状态；动触头无明显磨損；中間触头有深1毫米的小面积椭圆形坑，但不影响繼續工作，因此机械强度符合要求。

三、絕緣試驗

分別在开关的合閘及分閘情况下；进行了正负极性全波300千伏，正负极性截波390千伏及工頻155千伏导电部分对地的耐压試驗，还进行了如上三种数值的触头間耐压試驗，全部試驗均是合格的。

四、电阻絲的热稳定性試驗

曾分別在持續時間为0.2、0.3、0.42、0.72及0.78秒下，通以63.2安的电流。0.2秒下試驗了10次，試驗时有小烟从油中冒出，試驗后观察电阻絲和絕緣筒，一切情况良好，表面无明显痕迹。当通电時間增长到0.78秒时，电阻絲方断裂。

在操作7560或10000千乏的电容器組时，流过电阻絲的电流分別为51.1或59.5安，“合分”操作时电阻的总通流時間接近0.19秒，可見电阻絲有一定的裕度。

結 論

1. 60千伏电容器开关通过了操作电容器組、机械强度、絕緣、热稳定等試驗，結果是滿意的。在并联电阻为465和767欧下，均可操作单組容量直至7560千乏的电容器組，母綫側对地最高过电压为1.4倍相压，涌流亦很低。但看来，465欧的电阻工作得更为滿意。

2. 就进行的試驗来看，可认为 $R_s/X_c = 0.286 \sim 1.32$ 是一較合适的范围。由此尚可推

論，用465欧操作10000千乏的电容器組也是可行的。

3. 在DW1—60多油断路器上加装并联电阻，是解决操作电容器組的經濟有效办法，便于迅速投产，也特別适于对旧开关的改造。本开关的制成对电力系统运行有很大的經濟意义。

4. 对60千伏电容器开关进行开断短路能力的試驗，無論对用户或制造厂來說都是必要的，应在今后有条件时完成这一試驗。

参 考 文 献

- [1] 带并联电阻的60千伏多油断路器投切电容器組試驗总结 錦州电业局
- [2] Some fundamentals on capacitance switching, I. B. Johnson等 AIEE. pt. II. 55年, p. 727~736.
- [3] Report on the operation of switched capacitors AIEE. pt. II. 55年12月, p. 1255~61.
- [4] Vacuum switch properties for power switching applications, H. C. Ross, AIEE. pt. II. 58年4月, p. 104~117.
- [5] SF₆ breakers installed to switch capacitors, Richard C. Hanna, Electrical world, 62年8月, Vol. 158, №9.
- [6] Cable Switching tests on a 230kV SF₆ circuit breakers, H. M. Fllis, IEEE. pt. II. 65年1月, p. 48~56.
- [7] High-voltage oil circuit breakers with resistance-equipped interrupters for capacitor switching, W. H. Leeds, AIEE. pt. II. 54年8月, p. 1032~1037.
- [8] Capacitor Switching with resistors, R. C. Van. Sickle等, AIEE. pt. II, 54年8月, p. 971~977.

电磁式空气断路器

过 軍 先

电磁式空气断路器利用电弧在磁场所受的作用力，使电弧向一定的方向运动，进入灭弧室而熄灭。这种断路器开断时所产生的电弧，从产生至熄灭都在空气中燃烧。与其他类型断路器比较，它具有许多独特的优点。油断路器虽然很早就已具有比较完善的性能，但它对某些工作条件，例如炼钢电炉和大型轧钢机的控制等需频繁操作的场合，无法胜任。电磁式空气断路器是为适应这种特殊的使用要求而发展起来的，自第一台高压电磁式空气断路器问世到现在还只有几十年时间，所以电磁式空气断路器仍在不断完善、不断发展的过程中。它在刚出现的阶段，有断流容量小、体积大和价格贵等缺陷，但随着技术的进展已逐渐得到克服，而其优点则愈益明显。因此它的使用范围已逐渐扩大，现在不仅在频繁操作的场合使用，已经成为在中等电压等级广泛使用的一种断路器。

电磁式空气断路器的优点是：

1. 灭弧室用耐弧材料制成或采取适当措施，使开断时所产生的电弧对灭弧室的损伤极为微小；接触系统主触点与燃弧点分开，燃弧点上镶有耐弧合金，载流能力不受电弧影响而降低。所以能反复开断电路不需检修，可满足频繁操作的要求。

2. 熄灭电弧不需任何辅助设备或辅助能源，不像油断路器需油的处理及贮存设备，压缩空气断路器需空气压缩装置。用在开关数量不多的场合较其他类型断路器为经济。

3. 电弧在电流自然过零时熄灭，没有再击穿现象，所以没有异常的操作过电压。开断能力不受短路功率因数、恢复电压固有上升速率等线路参数的影响。

4. 不采用可燃性材料，没有失火或爆炸的危险，适用于在防火防爆要求高的场所。在矿井或人口稠密地区的变电所中，有用它来替代油断路器的趋势。

5. 为与灭弧室的频繁开断的能力相适应，断路器具有极高的机械强度，能经受几次，甚至几十万次的操作。

6. 结构简单，不需精密加工。

7. 维修工作量小，能减少运行人员，节省运行费用。

电磁式空气断路器的工作原理

电磁式空气断路器按其熄弧原理可分为两大类。

第一类为具有金属栅片灭弧室的断路器。它依靠电流过零后电弧阴极附近立即出现约250伏绝缘强度的现象完成电路的开断。电弧受磁场的作用进入灭弧室，并被金属栅片分割成许多短弧。电流过零后，每一段电弧在其阴极附近均产生一定的绝缘强度，如金属栅片有足够的数量，各段电弧所生的绝缘强度的总和大于线路的恢复电压，开断即告成功。近阴极效应发生在阴极附近的极小空间内，与电弧的其他区域无关，为了减小灭弧室的尺寸，应使金属栅片尽可能的靠近。

金属栅片灭弧室要成功的开断电路，除必须具有足够数量的栅片之外，还必须防止弧根过热。否则近阴极效应将消失，不能开断电路。因此，对于容量较大的断路器，电弧成为短弧后，要有较高的运动速度；并且灭弧栅片需要有较大的热容量。

这一类断路器是在低压空气开关的基础上发展起来的，出现得最早。虽然能够设计出容

量大、电压高的断路器，但是体积庞大成本昂贵，没有实际使用价值。目前，这种类型的结构有仅用以制造3千伏以下的小容量断路器的趋势。

第二类为具有狭缝灭弧室的断路器。这是目前的主要发展方向。它依靠狭缝的两壁对电弧的压缩和冷却作用，加速弧道去游离，熄灭电弧，开断电路。

电弧在磁场作用下进入狭缝灭弧室，由于缝的逐渐变狭及电弧不断拉长，去游离作用加强，弧柱电压降逐渐增加。当弧柱电压增至线路电压的60~70%时，电流过零后，电弧就不能重燃。为了减小灭弧室的体积，希望能以较小的电弧长度来达到所需的弧柱压降，即获得较高的弧柱电位梯度。弧柱电位梯度可近似的用下式表示：

$$E = \frac{19}{\sqrt{\delta}} \text{伏/厘米}$$

式中： δ ——缝宽（厘米）

由此可见，弧柱电位梯度与缝宽有密切的关系，应该尽可能的减小狭缝的宽度。在此还需指出，要获得符合上式计算的结果，灭弧室中电弧所生的游离气体必须能够顺利的排出。否则，由于游离气体的壅积，将得不到预期的结果，甚或在灭弧室下部发生再击穿。

电流过零后游离气体的复合速度对断路器的开断性能有很大影响。电弧是否能在恢复电压的作用下重燃，主要决定于电流过零后弧道的消游离速度，所以要增加断路器的断流容量，灭弧室必须具有在电流过零后迅速降低弧道游离度的能力。

狭缝灭弧室熄灭电弧需要有高的弧柱压降，因此，即使在线路的短路功率因素为零的情况下，由于加入了电弧电阻，熄弧不发生在电压峰值的时候，再加弧道在达到完全消游离前的残余电导的作用，大大降低了恢复电压的幅值和上升速率，并使之基本上不受线路参数的影响。图1示出电磁或空气断路器与压缩空气断路器开断同一电路时的恢复电压特性。恢复电压的第一个波峰分别为额定电压峰值的

0.35倍和1.9倍。

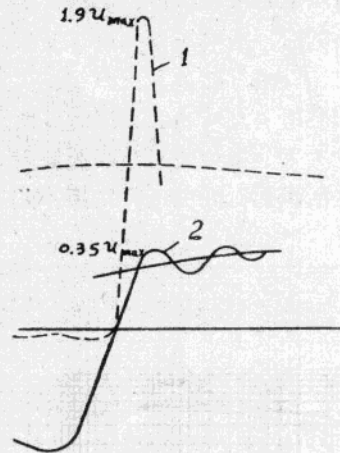
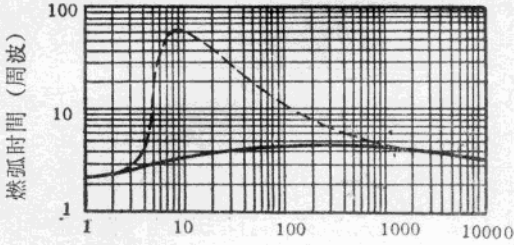


图1 电磁式空气断路器与压缩空气断路器的恢复电压
1. 压缩空气断路器 2. 电磁式空气断路器

使电弧运动的磁场可由串联电磁铁或环绕电弧的开槽铁板产生。为克服电弧运动中的阻力，磁场必须有足够的强度。磁场还应使电弧近似成一直线运动，电弧如果弯曲，将使灭弧室高度增大，或造成灭弧室局部过热，降低开断能力。而由于进入灭弧室前电流回路的电动力和热气流的作用，电弧均呈自然凸起。要将电弧拉平，使磁通密度与电弧电流之间具有相位差有显著的效果。此时，在每一半波中，只有一部分时间电磁力是将电弧吸入灭弧室，而在另一段时间内，将阻止电弧进入灭弧室。所以电弧的凸起部分将在此受到阻滞而使电弧平直。在这种情况下，电弧只能在灭弧室中停留一个半波的一部分时间，但是适当的設計完全能使电弧在这一段时间内熄灭。电弧在灭弧室中停留的时间短，减少了传给灭弧室的热量，可缩短连续操作的时间间隔。而且使电流零点前后电磁力的变化速率增大，有利于此时的消游离作用，上面已经讲过，这能使断流容量显著增加。所以使磁场与电流之间具有相位差，已为电磁式空气断路器的制造者普遍采用。

电磁式空气断路器的磁场是由电弧电流产生的，开断1000安培以下的电流时，电流小磁场太弱，需经很长时间电弧才能熄灭。为此装

設了空气吹弧装置，空气吹弧装置一般由气缸、活塞和傳动連杆組成，其噴口对准燃弧点。在分閘时，活塞壓縮空气，使气流經噴口吹向电弧，促使电弧进入灭弧室熄灭。图2示出有吹弧装置与沒有吹弧装置的开断电流与燃弧時間的关系。图中表示出吹弧装置对縮短开断小电流的燃弧時間的巨大作用。



开断电流 (安)

图2 燃弧時間—电流特性

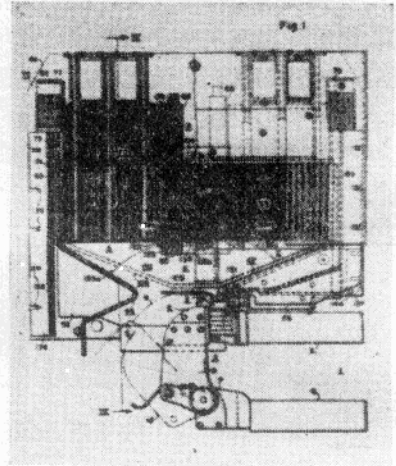
实綫——有吹弧装置； 虛綫——无吹弧装置

近年来电磁式空气断路器的发展

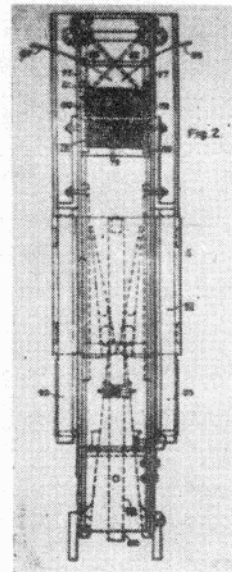
1. 13.8千伏1000兆伏安电磁式空气断路器 这是当前断流容量的最高定額，由美国1960年制成。图3示出其灭弧室部分的結構，图4为其熄弧瓷板。从图4可以看到瓷板1、2互相間隔，且使相邻的板的开端槽3的顶点分别占有中心綫左侧或右侧的位置。开断时所产生电弧首先被槽3拉成曲折形状，再向上运动，被槽4分为两条并联的电弧，这两电弧在板2的槽5中又合并为一。由于断流容量的提高，瓷板之間需要有較大的間隙，使电弧能順利的上升。但这样会降低熄弧能力，現在将电弧一分二，就可采用較小的間隙，使电弧受到强烈的冷却和去游离作用，保证了极高的断流容量。在每一組熄弧瓷板之間有三个排气道23，它能使电弧迅速上升，并通暢的排出电弧所产生游离气体，保证灭弧室正常工作。在开断全容量时，气体的压力可能使板1、2破裂，粘結在板1、2之間的支撐6、7，使板增强，消除了这类事故。

电磁铁92(見图3)采用H形的铁心，磁場

均匀，铁心中的磁势降落較小，铁心截面比采用其他型式时小。为进一步減輕铁心重量，磁极93的截面由中央向两端随磁通的减少而递减。电磁铁的工作气隙很大，所以漏磁通能达到全部磁通量的一半以上。漏磁通使铁心中的磁势降落增大，尤其当开断全容量铁心比較飽和时更为显著。为了减少漏磁通，极板周圍設置了漏磁抑制环104，它由寬1吋、厚半吋的銅板制成。漏磁抑制环的磁阻抗使漏磁通大大减少，



(a)



(b)

图3 13.8千伏、1000兆伏安电磁式空气断路器的灭弧室

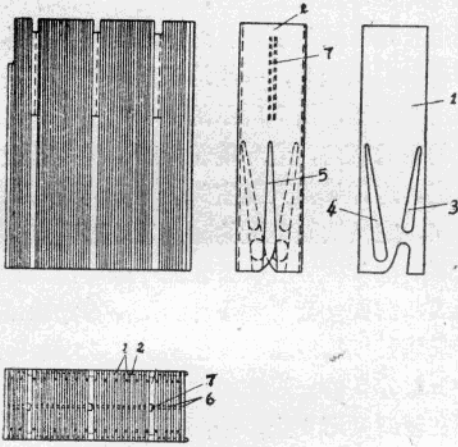


图4 熄弧瓷板

1, 2—瓷板; 3, 4, 5—槽; 6, 7—支撑

铁心的磁势降落随之减少, 工作气隙的磁通密度显著增加。磁轭100被屏蔽环134所包围, 屏蔽环134的磁阻抗使磁通与电弧电流之间产生一相位差, 以造成最有利的熄弧条件。

在屏蔽环134与弧角122或123之间放置着辅助熄弧瓷板88。以前辅助熄弧板放在屏蔽环的下面, 只能有较短的长度, 曾发现电弧沿屏蔽环下表面燃烧, 不能熄灭, 使电磁铁的线圈不能串入电路, 开断失败。本开关中, 电弧中间一段133b被屏蔽环分为133b₁和133b₂二部分, 分别进入两组辅助熄弧板中, 由于它有较大的高度, 不会再在顶部击穿, 能可靠的将电弧熄灭, 使吹弧线圈迅速接入电路。

电磁式空气断路器的电磁铁的磁场强度受到开关体积等因素的限制, 要防止在灭弧室下部发生击穿, 需控制灭弧室内游离气体的压力在一定范围之内。对高达1000兆伏安的断流容量, 排出气体的游离度将是较高的。为防止在灭弧室顶部发生击穿, 排气道23被接长, 延长部分高出瓷板13, 14约6吋, 被排气道隔开的相邻二段瓷板分别向左、右排气(见箭头86, 87), 并在弧角处设置冷却器76, 使弧角附近的游离气体通过冷却器后分别向前后排出。游离气体还可以通过瓷板与灭弧室框或排气道延长部分间的缝隙漏泄而引起击穿, 所以在装配

灭弧室时, 对可能发生漏泄的地方均用环氧树脂石英砂塑料胶装, 达到气密。采取这些措施后, 能开断130%额定容量而不引起再击穿。

2. 带有绝缘铜片灭弧室的空气断路器

在这种断路器中, 使电弧运动的磁场由嵌在熄弧板内部的钢板形成。图5示出电压为3千伏的断路器的熄弧板, 铁板外的绝缘层为云母玻璃, 能经受电弧烧灼而不损坏。钢板造成的磁场比电磁铁的要弱得多, 但试验证明能够得到满意的熄弧效果, 现在已制成额定电压11千伏, 额定断流容量750兆伏安的产品。

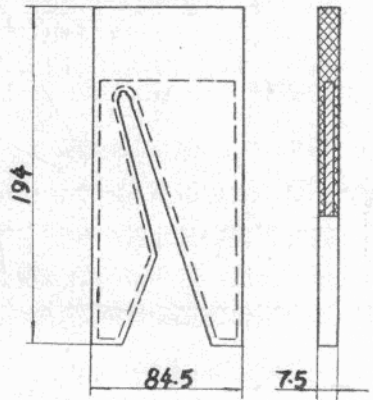


图5 3千伏断路器的熄弧板

由于磁场较弱, 在开断过程中, 常在电弧中部与触头之间产生下燃支弧, 并使一部分熄弧板失去作用。如下燃支弧产生在熄弧板的槽中, 将受磁场作用重新回到灭弧室内熄灭; 如下燃支弧沿熄弧板的表面产生, 则将失去控制导致开断的失败。为控制下燃支弧, 熄弧板间的隔板制成如图6所示的形状, 凸出部分1减小了熄弧板之间的通道, 迫使下降支弧只能在槽中产生。

3. 带有螺旋电弧灭弧室的空气断路器

这是近年来发展起来的新的结构, 最大断流容量亦已达到1000兆伏安。图7为其工作原理图, 电弧进入灭弧室后被装在瓷板下部的辅助弧角分割成短弧, 由于同一间隔内的弧角在二瓷板的相对表面上交叉放置, 弧角与电弧组成一螺旋形电路, 电弧在此螺旋管所产生的磁场的电磁力的作用下, 成椭圆形拉长, 与其他

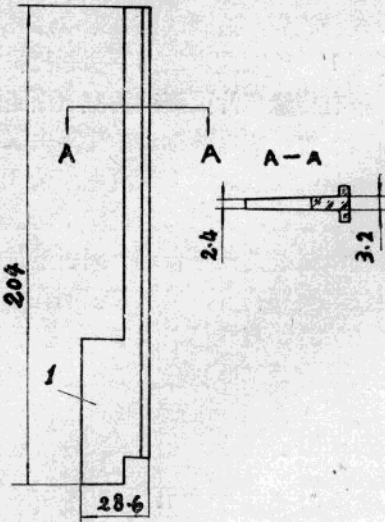


图6 3千伏断路器的隔板

灭弧室相比，每一间隔中的电弧元可达到大得多的长度，能在灭弧室尺寸较小的情况下达到熄弧所需的临界长度。这种结构的出现是电磁式空气断路器小型化的重大进展。

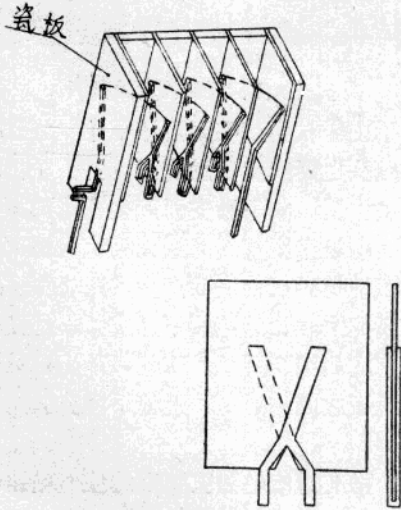


图7 螺旋电弧灭弧室工作原理图

电弧被导入灭弧室时，发现有停滞于入口不能进入熄弧区的现象。为此必须设置一外加磁场帮助电弧上升，一般均采用串联电磁铁产生所需的磁场，图7所示的结构采用铁磁材料制造的辅助弧角，它环绕着电弧，将电弧吸入灭弧室。这样使得灭弧室的结构更为轻巧。

4. 空气吹弧装置的改进及外隔离点 帮助开断小电流的空气吹弧装置一般均由气缸活塞组成，需要一套传动连杆。法国首先采用折皱管来代替气缸活塞以简化结构。如图8所示，折皱管5的一端连接在闸刀3上，另一端连接在辅助闸刀4上，分闸时辅助闸刀受止钉7的阻碍不能转动，折皱管被压缩，气流通过喷嘴6吹向电弧。此时辅助闸刀逐渐向下滑动，到电弧熄灭后，它已低于止钉7，于是随着主闸刀一起转动，离开辅助触头8，形成一外隔离点，使灭弧室不承受外过电压的作用。

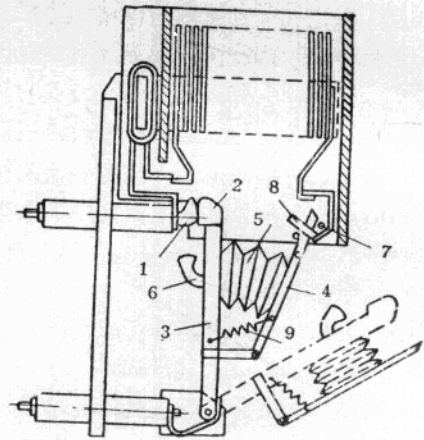


图8 带有隔离点的电磁式空气断路器

- 1—静触头； 2—动触头； 3—闸刀；
- 4—辅助闸刀； 5—折皱管； 6—喷嘴；
- 7—止钉； 8—辅助触头。

电容套管設計及有关参数的确定

虞 恬

电容套管是高压断路器上广泛应用的一种絕緣元件，近年来，由于超高压网路不断发展，电容套管的工作电压已經达到500~800千伏，并广泛采用新材料、新技术，如油紙型结构，采用油浸电纜紙、电容器紙，采用印刷电路技术来代替鋁箔结构等等。因此产品结构大大縮小，为便于我們掌握电容套管設計，迅速改进現有结构，故对目前已有的电容套管設計方法及有关参数的确定予以整理，供設計新产品时参考。鉴于有关文献已对公式来源作了推導、介紹，故本文不再重复，現对电容套管設計及有关参数的选定分述如下：

表 1

額定电压 U_n (千伏)	最大工作 电压 U_{pm} 千伏有效 值	工頻試驗电 压(內絕緣) U_n 千伏有 效值	干放电电 压(50~) U_c 千伏有 效值	工頻湿放 电电压 U_m 千伏有 效值	冲击放 电电压 U_n 全波最大 值
3	3.5	25	27	20	44
6	6.9	32	36	26	60
10	11.5	42	47	34	80
15	17.5	57	63	45	105
(20)	23	68	75	55	125
35	40.5	100	110	85	195
60	69	165	180	140	335
110	$126/\sqrt{3}$	265	295	215	480
154	$177/\sqrt{3}$	340	375	290	660
220	$252/\sqrt{3}$	490	550	425	950

I. 对高压电容套管的基本要求

1. 套管的最小工頻击穿电压不能低于外部絕緣干試驗电压 U_c 的 K_n 倍。

对于主要是液体絕緣，油紙絕緣的套管 $K_n=1.2$;

对于主要是混合液絕緣的， $K_n=1.3$;

对于主要是固体絕緣的 $K_n=1.6$;

对于浸在油中套管表面的閃絡电压 $K_n=1.2$ 。

2. 套管应能耐受工頻試驗电压 U_n ，对于电瓷及液体絕緣的套管应能耐受一分钟，对于固体絕緣的套管，应能耐受5分钟。

3. 套管的冲击放电电压 U_n 不得低于表1中規定的值。

4. 套管在額定电流下，周圍溫度40°C时的热击穿电压不得低于最大工作电压的1.1倍，对于60千伏及以下的套管最大工作电压指綫电压，对于110千伏及以上的为相电压。

II. 电容套管基本参数的确定

已知条件：

U_n 額定电压（綫电压千伏有效值）

I_n 額定电流（安）

一、确定基本尺寸

1. 根据 U_n 从国家标准查得 U_c 、 U_n 、 U_m 、 U_{pm} 。

U_c 干放电电压（千伏有效值）

U_m 湿放电电压（千伏有效值）

U_n 冲击放电电压（千伏峰值，全波）

U_n 工頻試驗电压（千伏有效值）

U_{pm} 最大工作电压（千伏有效值）

2. 定出套管的工作电压 U_p

$U_p = \frac{1.1 \sim 1.15 U_n}{\sqrt{3}}$ 千伏有效值（即最大工作相电压）

3. 确定套管的总厚度 ηs 。

$$\eta s = \frac{U_p}{0.8 E_p}$$

式中 η 为电极层数；

s 为每层絕緣厚度（毫米）；