

高等学校教材

金属氧化物避雷器

西安交通大学 王秉钧 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书内容包括·金属氧化物避雷器的基本概念,金属氧化物避雷器在工频电压、暂时过电压、操作过电压、雷电过电压下的工作状况及有关科研课题。编者结合有关的国家标准、国际标准、一些有代表性的科技资料以及编者所在单位的科研工作,对上述诸问题作了说明。

本书系高等学校“高电压技术及设备”及有关专业的选修课教材,还可供运行、制造等方面的工程技术人员参考。

高等学校教材

金属氧化物避雷器

西安交通大学 王秉钧 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京樱花印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8.75印张 195千字

1993年10月第一版 1993年10月北京第一次印刷

印数0001—1700册

ISBN 7-120-01859-0/TM·489

定价4 10元

前 言

金属氧化物避雷器 (Metal Oxide Surge Arrester—MOA) 是近20年来在过电压防护方面的一项最突出的科研成果。由于其阀片具有更好的非线性, 在给定波形、幅值的冲击电流流过时的压降 (即残压Residual Voltage— U_r), 较过去广泛使用的、以碳化硅为阀片主要材料的碳化硅阀式避雷器(Conventional Silicon Carbide Valve Type Surge Arrester—CA) 的残压值要低, 故被保护设备的绝缘水平可以降低, 配电装置的尺寸、变电站的占地面积等均可减少。

由于同样的原因, 当作用于MOA上的电压为电力系统的最高工作相电压 $U_{ph:m}$ (或超过它不多) 时, 流过它的阻性电流 I_R 及其功率损耗又几乎可忽略不计。故 MOA 可直接承受 $U_{ph:m}$ 的长期作用, 而无需串联放电间隙。去掉放电间隙及为改善其放电特性、灭弧特性而设的附件, 自然会使MOA的尺寸、质量等, 较CA降低很多。

此外, MOA吸收过电压能量的能力较CA大, 可简化电力系统的过电压防护措施, 如取消断路器中的合闸电阻等, 这也将带来可观的经济效益。

这里仅以西安高压电瓷厂 (以下简称西瓷厂) 制造的MOA、CA为例, 它们的残压、高度、质量的对比如表0-1所示。

表 0-1 MOA、CA的残压、高度、质量对比

系 统 标 称 电 压	最高长 期工作 电 压 有效值	避 雷 器 型 号		8/20 μ s、10kA 下的残压, 峰值不大于 (kV)		避 雷 器 高 度 (mm)		避 雷 器 质 量 (kg)	
		MOA	CA	MOA	CA	MOA	CA	MOA	CA
kV	kV								
110	73	Y10W ₁ -100/248	FCZ ₁ -110J	248	285	1375	1715	160	270
220	146	Y10W ₁ -200/496	FCZ ₁ -220J	496	570	2690	3068	330	498
330	210	Y10W ₁ -300/693	FCZ ₁ -330J	693	820	2936	4220	394	1461
500	318	Y10W ₁ -444/995	FCZ-500J	995	1100	5040	6035	1069	2076

对于MOA的运行及制造问题, 国内外的许多单位进行了大量的试验研究工作, 发表了许多论文及科技报告, 但较为系统地讨论MOA的运行特性、它应具有的技术条件、制定其技术条件的依据等的专著, 尚不多见。

鉴于此, 根据能源部高等学校电力类教学委员会的决定, 由编者编写此书。

本书是编者根据我校承担的“500kV金属氧化物避雷器的技术条件”、“500kV输变电设备降低绝缘水平可能性研究”等课题进行的研究工作, 编者指导的研究生撰写的学位论文, 有关的标准及参考资料, 并结合编者多次授课的经验写成的。内容包括: 有关MOA

的基本概念，在长期工频电压及暂时过电压下、在操作过电压下、在雷电过电压下的工作状况及有关科研课题。本书可供有关专业的大学生、研究生作为选修课教材，也可供运行、制造单位的工程技术人员参考。

本书由华中理工大学电气工程系梁毓锦教授审阅，他对本书内容的选定、章节的安排、文字表达等方面都提出了宝贵的意见。但限于编者的水平，书中仍难免有不当甚至谬误之处，欢迎读者指正。

最后，向审稿的梁毓锦教授，与作者共同进行研究工作的诸同志，被本书所引用的参考文献的作者（包括一些未公开发表的文献的作者）以及为我们科研课题提供经费的单位一并致谢。

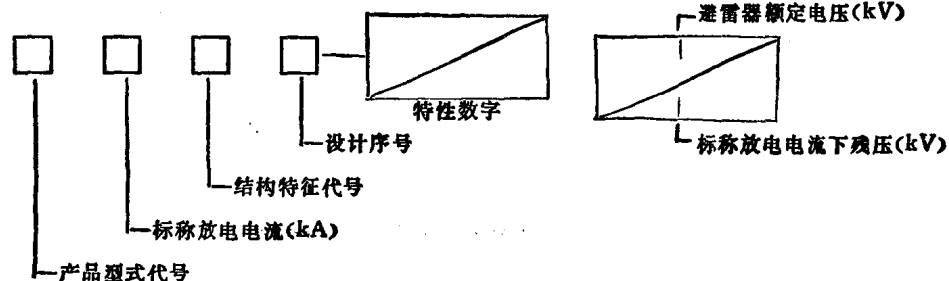
编 者

1992年7月

本书常用符号及其单位

MOA	金属氧化物避雷器 (Metal Oxide Surge Arrester)
CA	碳化硅阀式避雷器 (Conventional Silicon Carbide Valve Type Surge Arrester)
U_n	系统标称电压, kV (有效值)
U_{1m}	系统最高工作线电压, kV (有效值)
$U_{ph.m}$	系统最高工作相电压, kV (有效值)
U_{rer}	避雷器的额定电压 (Rated Voltage of an Arrester), kV (有效值)
$U_r(U_{rer})$	避雷器的残压 (Residual Voltage of an Arrester), kV (峰值), 或以 $\sqrt{2}U_{ph.m}$ 为基础值的标么值 (pu)。为作区分, 再加下标 ls 、 os 、 sl 分别表示雷电、操作、陡波冲击电流下的残压
I_n	避雷器的标称放电电流 (Nominal Discharge Current of an Arrester), kA (峰值)、波形为 8/20 μ S
I_{os}	避雷器的操作冲击电流 (Switching Surge Current of an Arrester), A 或 kA (峰值)、波形 30/80 μ S
U_c	避雷器的持续运行电压 (Continuous Operating Voltage of an Arrester), kV (有效值)
I_{rer}	避雷器的参考电流 (Reference Current of an Arrester), mA (峰值), 交、直流时再加下标 ac 、 dc 区分
U_{rer}	避雷器的参考电压 (Reference Voltage of an Arrester), kV (峰值), 交、直流时再加下标 ac 、 dc 区分
η	避雷器的荷电率 (Applied Voltage Ratio of an Arrester)
BIL	基本雷电冲击绝缘水平 (Basic Lightning Surge Insulation Level), kV (峰值)
BSL	基本操作冲击绝缘水平 (Basic Switching Surge Insulation Level), kV (峰值)

MOA的型号表示方法



产品型式代号 Y —— 金属氧化物避雷器

结构特征代号 W —— 无放电间隙

例如 Y10W₁-444/995

目 录

前 言

本书常用符号及其单位

第一章 有关的基本概念	1
第一节 阀片及重要的名词、术语	1
第二节 工频电压下的伏安特性	4
第三节 阀片的脉冲响应与动态伏安特性	5
第四节 阀片的等值回路	7
第五节 金属氧化物避雷器总体的伏安特性	8
第六节 阀片伏安特性数据处理与金属氧化物避雷器的数学模型	10
第七节 金属氧化物避雷器中的能量损耗估算	15
第八节 金属氧化物避雷器的热状态分析	17
第九节 金属氧化物避雷器电气特性初步设计	20
第二章 金属氧化物避雷器在工频电压及暂时过电压下的工作状态	24
第一节 暂时过电压的计算	24
第二节 暂时过电压的实测数据	28
第三节 加速老化试验与运行寿命估计	30
第四节 工频耐受试验方法及有关标准摘录	32
第五节 对工频耐受曲线的一些讨论	36
第三章 金属氧化物避雷器在操作过电压下的工作状态	40
第一节 我国及IEC规定的金属氧化物避雷器操作冲击负载试验方法及标准	40
第二节 前苏联金属氧化物避雷器通流容量的试验方法	45
第三节 金属氧化物避雷器在含有分布参数长线系统的操作过电压下的工作状态	49
第四节 金属氧化物避雷器在操作过电压下的保护范围	54
第五节 高压系统中金属氧化物避雷器在操作过电压下的年动作次数的估计	57
第六节 金属氧化物避雷器在操作过电压下动作负载的一般规律性	60
第七节 金属氧化物避雷器在合闸过电压下的动作负载的估算	66
第八节 金属氧化物避雷器在集中参数振荡回路的过电压下的动作负载问题	70
第九节 金属氧化物避雷器对切断感性电流过电压的限制	73
第十节 金属氧化物避雷器在系统 $\frac{Z_0}{Z_1}$ 突增及突然接地时的动作负载	76
第十一节 金属氧化物避雷器在电弧接地过电压下的工作状态	78
第四章 金属氧化物避雷器在雷电过电压下的工作状态	85
第一节 远区雷击时金属氧化物避雷器放电电流的估计	85
第二节 近区雷击时金属氧化物避雷器极限放电电流的估计	87
第三节 利用金属氧化物避雷器作行波防护的定性分析	90

第四节	接在变压器中性点与低压侧的金属氧化物避雷器的工作状况	93
第五节	有电缆段时金属氧化物避雷器保护效果的数值计算	96
第六节	金属氧化物避雷器的数学模型对行波防护可靠性的影响	99
第五章	有关科研课题	102
第一节	仅用金属氧化物避雷器限制合闸、重合闸过电压可能性问题	102
第二节	可更有效地限制相间过电压的金属氧化物避雷器	106
第三节	降低绝缘水平问题	111
第四节	高海拔及污秽地区使用金属氧化物避雷器时的问题	115
第五节	金属氧化物避雷器在铁磁谐振过电压下的工作状况	117
结束语	124
附录一	我国10kA级交流无间隙金属氧化物避雷器技术特性	126
附录二	GE公司TRANQUELL® XE型电站型MOA技术特性	126
附录三	前苏联MOA技术特性	127
参考文献	128

第一章 有关的基本概念

第一节 阀片及重要的名词、术语

一、金属氧化物避雷器的阀片

现广泛使用的金属氧化物避雷器阀片(以下简称为阀片)是以氧化锌(ZnO)为主要成份,加入少量的添加剂,如氧化铋(Bi_2O_3)及一些其他的金属氧化物,经过锻烧、混料、造粒、成型、涂敷高阻层等工序,在高温下烧结而成的。我国阀片的配方和其中各原料对阀片电气性能的影响,可参考有关资料[●]。

据参考文献[1]可知,日本现已制出以氧化镨(Pr_2O_3)为主要添加剂的阀片,其性能较以氧化铋为主要添加剂的阀片好。

阀片的微观结构如图 1-1 所示,其中 1 为 ZnO 的晶粒,其平均直径约为 $10\mu m$,电阻率约为 $1\sim 10\Omega\cdot cm$ 。2 为主要由氧化铋构成的晶间层,厚度约为 $0.1\mu m$ 。3 是杂散地分布于晶间层内的尖晶石(Zn,Sb_2O_{11}),其直径约为 $3\mu m$,尖晶石对阀片的电气特性无显著影响。

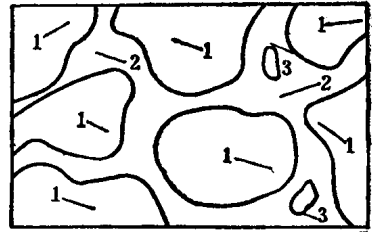


图 1-1 金属氧化物避雷器阀片的微观结构

一般认为,由于在晶粒与晶间层间形成了势垒,故使阀片具有很强的非线性,对此问题,不多作介绍。

二、全伏安特性

(一)非线性伏安特性曲线的表示方法及其特点

由于MOA的总体与单个阀片的伏安特性间有简单的换算关系,故可合并讨论。当流过MOA总体(或单个阀片)的电流 I 为已知时,为计算其压降 U ,可令

$$U = AI^\alpha \quad (0 < \alpha < 1) \quad (1-1)$$

对上式进行变形,可得已知压降 U 时计算 I 的表达式

$$I = \left(\frac{U}{A}\right)^{1/\alpha} = \left(\frac{U}{A}\right)^\beta = BU^\beta \quad (1 < \beta < \infty) \quad (1-2)$$

式中的 $\beta = \frac{1}{\alpha}$, $B = A^{-\beta}$ 。

α 或 β 均可用来表示MOA的总体或阀片的非线性特性,均被称为非线性系数。如果用含 α 的表达式,则其 α 值愈小,表明MOA(或阀片)的非线性愈强,电流 I 在很大范围内变动时,压降 U 变化不大。如果用含 β 的表达式,则其 β 值愈大,表明MOA(或阀片)的非线性就愈强,压降 U 在很小范围内变化时,将使流过的电流 I 有很大的变化。这两种

● 张运庭等编, 避雷器设计工艺与试验, 西安高压电瓷厂, 1985。

表示方法均有其实用意义。例如由于 α 较小，流过大幅值的雷电流时，压降增加不多，避雷器具有良好的保护特性；而由于 β 较大，当压降降至正常的工作电压时，流过的电流几乎可忽略不计，可不需串联放电间隙，使避雷器的结构大为简化等。为照顾我国工程界的习惯，本书中多用 α 这一非线性系数。

下面首先说明阀片与MOA总体的伏安特性间的换算关系。假定的前提条件是：压降沿阀片的高度均匀分布；电流沿其截面均匀分布。设高度为 h 、截面为 S 的单个阀片的伏安特性如式(1-1)所示，则 m 片阀片并联成组、 n 组串联所组成的MOA的伏安特性显然为

$$nU = nAI^\alpha = \frac{nA}{m^\alpha} (mI)^\alpha \quad (1-3)$$

式(1-3)说明：两阀片即使其非线性系数 α 完全相等，但由于它们的高度、截面不同，伏安特性的数据也会有差异。为了避免误解及需要进行比较时，宜采用式(1-1)的变化形式

$$E = aJ^\alpha \quad (1-4)$$

式中的 $E = \frac{U}{h}$ 、 $J = \frac{I}{S}$ ，分别为作用于阀片的电场强度与流过的电流密度； $a = AS^\alpha/h$ 。

其次来说明伏安特性的一些特点。碳化硅阀片的伏安特性的特点是已知的，即当电流值 I 一定时，压降 U 与电流波形、阀片温度等有关，即式(1-1)中的两个特性参数 A 、 α 均与这些参量有关。此外，还有由于阀片并非纯阻性元件，则压降 U 和电流 I 的最大值并非同时出现等特点。

将氧化锌阀片、MOA与碳化硅阀片、CA对比，二者类似之处在于伏安特性的特点是共有的，仅有程度上的差异。二者差别之处在于：在CA中，感兴趣的电流范围较窄（数十至数百安的工频续流及几千至数十千安的雷电流），操作冲击电流一般不考虑，决定其工作与保护特性的，还有其串联放电间隙的伏秒特性；而在无串联放电间隙的MOA中，感兴趣的电流范围极广（ $10^{-5} \sim 10^4 A$ ），其工作与保护特性均由阀片的伏安特性决定。为了叙述的方便，下面先讨论MOA总体的全伏安特性，然后再作较深入的分析。

(二) 全伏安特性

MOA的阀片或总体的全伏安特性是指在有实用意义的全部电流范围内（约 $10^{-5} \sim 10^4 A$ ），压降与电流的关系曲线。为了便于实用，在不同的电流区段内，所用的试验电流波形是不同的，以期能得到更接近实际的、在不同类型的电压和过电压下的压降与电流关系。遗憾的是，由于问题的复杂性，有些区段的电流范围的划分和该区段所用的试验电流波形，目前尚未有统一的规定。

这里先给出MOA总体或阀片的静态（即不考虑电压、电流最大值出现时间及波形的差异）全伏安特性曲线，如图1-2所示，以便介绍一些重要的名词、术语。

三、一些重要的名词、术语

MOA的重要名词、术语较多^{[1][2]}，这里只介绍出现于其全伏安特性曲线中的一部分。

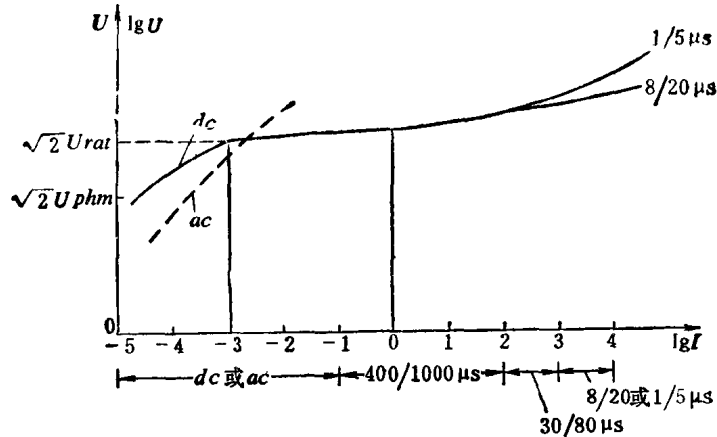


图 1-2 金属氧化物避雷器的静态全伏安特性曲线

(一) 参考电流及参考电压

参考电流 $I_{ref.ac}$ 是用来决定交流参考电压 $U_{ref.ac}$ 及流过阀片（或MOA总体，下同）的阻性电流（峰值）的，其值应足够大，以使 $I_{ref.ac}$ 的测量结果几乎可不受寄生电容的影响；但其值又不能过大，以避免发热。参考电流值视阀片截面积的大小，可有不同的值。附录一中MOA的 $I_{ref.ac} = 2 \sim 5 \text{mA}$ 。

为了避免测量中出现的困难，我国还取直流参考电流 $I_{ref.dc} = 1 \text{mA}$ 进行测量。当 $I_{ref.ac} = I_{ref.dc} = 1 \text{mA}$ （即 $\lg I = 0$ ）时，通常 $U_{ref.ac} < U_{ref.dc}$ ，如图1-2所示。

(二) 避雷器的额定电压

在由避雷器动作负载试验条件所规定的一系列试验中，允许施加于MOA上的工频电压最高值（kV，有效值）称为避雷器的额定电压 U_{rat} 。对 $U_{rat} = 96 \sim 312 \text{kV}$ 的MOA， $\sqrt{2} U_{rat} = U_{ref.ac} (2 \sim 3 \text{mA}) \approx U_{ref.dc} (1 \text{mA})$ ；而对 $U_{rat} = 420 \sim 468 \text{kV}$ 的MOA， $\sqrt{2} U_{rat} = U_{ref.ac} (5 \text{mA}) \approx 1.05 U_{ref.dc} (1 \text{mA})$ 。

(三) 操作冲击电流与残压

操作冲击电流 I_{op} 的波形，我国取为 $30/80 \mu\text{s}$ ，其幅值与MOA的 U_{rat} 及其使用场合、放电等级有关，为 $100 \sim 2000 \text{A}$ 。此时的压降为操作冲击残压 U_{res} ，它就是MOA对输变电设备的操作冲击保护水平^[4]。

(四) 雷电冲击电流与残压

雷电冲击电流 $I_{L.s}$ 的波形，我国取为 $8/20 \mu\text{s}$ （标准波）及 $1/5 \mu\text{s}$ （陡波）。前者还用来区分MOA的等级，故又称之为标称放电电流 I_n ，其值亦与MOA的 U_{rat} 及其使用场合、放电等级有关，为 $1 \sim 20 \text{kA}$ 。波形为 $8/20 \mu\text{s}$ 的冲击电流下的残压记为 U_{res} ；而当电流波形为 $1/5 \mu\text{s}$ 时，则称此时的残压为陡波冲击电流残压，记为 U_{res1} 。根据参考文献[4]，对常用的输变电设备（非GIS），取 U_{res} 及 $\frac{U_{res1}}{1.15}$ 两数值中大的一个为MOA的雷电冲击保护水平。

在GIS中，由于操作、故障等，可能产生波形极陡的过电压与过电流^[5]，此时MOA

的试验电流波形正在研究中。

(五) 避雷器的持续运行电压

避雷器的持续运行电压 U_c 是允许长期施加于MOA两端子间的工频电压有效值。它表征了MOA对长期作用的工频电压的耐受能力，故其值应随MOA的 U_{ref} 的加大而加大。我国只是在几个电压等级中，由于MOA可供选择的 U_{ref} 较多，才取 $U_c \geq U_{ph.m}$ ，其余情况下，均取 $U_c = U_{ph.m}$ 。

(六) 荷电率

我国规定持续运行电压的峰值与直流参考电流(1mA)下的压降的比值为荷电率 η ，即 $\eta = \frac{\sqrt{2}U_c}{U_{ref.dc(1mA)}}$ 。由图1-2可见，总有 $\eta < 1$ 。在有些资料中，又称 η 为加压比。

第二节 工频电压下的伏安特性

无串联放电间隙的MOA将长期地受到工频电压的作用。根据测量，此时流过的电流，既有阻性电流 I_R ，又有容性电流 I_C 。本节中将介绍一些实测数据，说明一些对MOA的运行监测有实用意义的结果。

一、电流与作用电压、温度等的关系

当作用于阀片(或MOA的总体，下同)上的电压 $u = U_m \sin \omega t$ 时，可以根据测得的 I_R 、 I_C 求出一些感兴趣的参数，如阀片的电容 C 、介质损失角的正切 $\tan \delta$ ，根据 I_R 计算 U_m 的非线性系数 α 等。

表1-1所示为西安电瓷研究所(以下简称西瓷所)在某一温度(数据缺)下，对直径、厚度分别为56、16mm的实芯阀片(记为 $\Phi 56 \times 16$ 片，以后对实芯片均用此种记录尺寸的办法)，测得及算得的值。

表 1-1 $\Phi 56 \times 16$ 阀片工频下的伏安特性与参数

U_m 峰值(kV)	0.537	1.414	1.994	2.220	2.320	2.550
I_R 峰值(μA)	50	100	300	550	1000	5000
C (pF)	1800.9	1368.7	1410.9	1469.9	1504.2	2210.5
$\tan \delta$	0.1644	0.1644	0.3394	0.5364	0.9124	2.824
α	1.396	0.918	0.724	0.654	0.654	0.1947

由表1-1可见，在一定温度下，阀片的一些参数的变化规律如下：

(1) 电容 C 与作用的工频电压峰值 U_m 间的关系曲线是V型的，在某一 U_m 时，有最小值；

(2) $\tan \delta$ 是 U_m 的单调上升函数， U_m 大于一定值后，随 U_m 的加大， $\tan \delta$ 剧烈地增加；

(3) 在不同的 I_R 、 U_m 范围内， α 有不同的值，在某一 I_R 、 U_m 范围内， α 值有突变。

上述的(1)、(2)两点与前苏联的测量结果^[6]相符。根据参考文献[6]，当 U_m

一定时, 如果阀片温度 T 上升, 则 C 与 $\text{tg}\delta$ 均增加, 但二者增加的幅度不同, 后者随 T 的上升, 增加得要剧烈一些。这就表明, U_m 一定时, T 上升, I_s 、 I_R 均增加, 但 I_R 增加得剧烈一些。而第(3)点, 则与日本的实测结果^[7]相符。

从实用观点出发, 以下只讨论 I_R 的变化规律。如上所述, I_R 是作用电压 U_m (或电场强度)、阀片温度 T (对可能劣化的阀片, 还将与电压作用时间有关)的函数。在图1-2中的工频电压作用范围内, 随 T 的不同, 将有一系列形状大体类似的伏安特性曲线(图中未画出)。

当将 I_R (总的峰值或其中某次谐波的峰值)随MOA的运行时间的变化规律作为运行监测指标时, 如考虑到 U_m 的变动范围较小, 则应将在温度 T 下测得的 $I_{R,T}$ 换算至标准温度 $T_0 = 293\text{K}$ 时的值, 以便互相比。为此, 定义阀片的电流温度系数 TCI 为

$$TCI = \frac{1}{T - T_0} \left(\frac{I_{R,T}}{I_{R,T_0}} - 1 \right) \quad (U_m = \text{const}) \quad (1-5)$$

则

$$I_{R,T_0} = I_{R,T} \frac{1}{1 + TCI(T - T_0)}$$

二、阻性电流中各谐波分量的相互关系

由于阀片的非线性, 当正弦电压作用时, 阻性电流除基波外, 还有一系列的奇次谐波。据有关资料, 劣化将主要使其中的3次谐波电流加大^[7], 受潮将主要使其中的基波电流加大。为了说明问题, 设 $\alpha = \text{const}$, 则根据参考文献^[8]及式(1-2), 当 $u = U_m \sin \omega t$ 时

$$i_R = B U_m^\beta \sin^\beta \omega t = I_R \sin^\beta \omega t \quad (1-6)$$

式中的 $I_R = B U_m^\beta$, 为阻性电流的峰值。

阻性电流中基频分量的幅值

$$I_{R:1} = 2I_R \frac{\Gamma\left(\frac{\beta+2}{2}\right)}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{\beta+3}{2}\right)} = 2I_R f(\alpha) \quad (1-7)$$

式中的 $f(\alpha) = \frac{\Gamma\left(\frac{\beta+2}{2}\right)}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{\beta+3}{2}\right)}$, 为 α 的函数, Γ 为伽马函数的符号。当电阻为线性电阻时, $\alpha = \frac{1}{\beta} = 1$, $\Gamma(1.5) = \frac{1}{2}\sqrt{\pi}$, $\Gamma(2) = 1$, $I_{R:1} = I_R$ 。

相邻的两个奇次(n 次、 $n-2$ 次)谐波阻性电流幅值间有如下的关系

$$\frac{I_{R:n}}{I_{R:n-2}} = \frac{\beta - n + 2}{\beta + n} \quad (1-8)$$

例如, $\alpha = 0.125$, $\beta = 8$ 时, $I_{R:3} = \frac{7}{11} I_{R:1}$ 。

第三节 阀片的脉冲响应与动态伏安特性

阀片的脉冲响应可分为: 给定幅值、波形的电流流过阀片时的电压响应; 给定幅值、波形的电压作用下的电流响应。

当着重研究目前多用的、部分地利用空气绝缘的变电站的过电压防护、绝缘配合问题时，我们感兴趣的是阀片在微秒至毫秒范围内的响应。当着重研究电气绝缘的变电站的同类问题时，则还应考虑10~100ns范围内的响应。

一、电压响应与动态伏安特性

图1-3示出了一非周期性冲击电流流过阀片时的压降波形示意图。图中 $U_{r,i}$ 、 $t_{r,i}$ 、 Δt 分别为起始电压脉冲的幅值、出现时间与持续时间； u_r 、 t_u 分别为持续时间较长的压降之幅值（即通常所谓的残压）及其出现时间； I_m 、 t_i 为电流的幅值及出现时间。

参看图1-3，压降的波形具有下列特点。

(1) 当电流的波形为双指数的非周期性冲击波时，单个阀片^{[9]、[10]}或整只MOA^[11]的压降示波图中均有起始的电压脉冲 $U_{r,i}$ 。当 $t_i \leq 8\mu s$ 时， $\Delta t \leq 150ns$ ^[9]， $t_{r,i} < 80ns$ ^[10]。起始电压脉冲的幅值 $U_{r,i}$ 则与电流波前部分的陡度有关，陡度愈大， $U_{r,i}$ 就愈大。但 $U_{r,i}$ 与 U_r 的相互关系却与被试品的特性有关，例如当 $I_m = 5kA$ （或 $10kA$ ）， $t_i = 8\mu s$ 时，就有 $U_{r,i} > U_r$ ^[11]， $U_{r,i} = U_r$ ^[9]， $U_{r,i} < U_r$ ^[10]几种不同的实测结果。 $t_i < 8\mu s$ 的 $U_{r,i}$ 与 $t = 8\mu s$ 的 U_r 之比的实测数据也不相同^{[9]、[10]}。

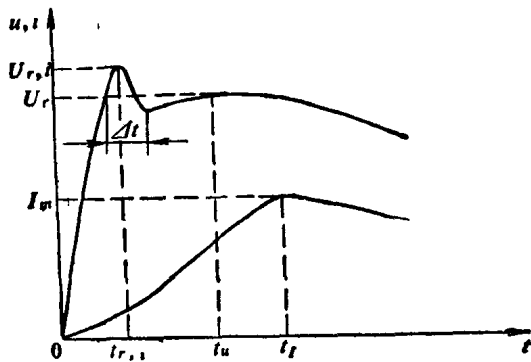


图 1-3 冲击电流流过时的压降波形示意图

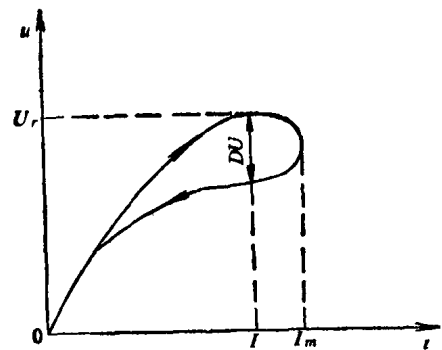


图 1-4 阀片的动态伏安特性

但在极陡的脉冲下，一般 $U_{r,i} > U_r$ ^[11]。

(2) U_r 、 I_m 并不是同时出现的，在所有的试验结果中，无例外地均有 $t_u < t_i$ ，此外，二者的波形也有较大差异（如压降的波长大于电流的波长等）。

在大电流范围内，通常给出的伏安特性曲线只是 U_r 、 I_m 的关系曲线，即所谓的静态伏安特性曲线。

(3) 如略去起始电压脉冲的影响，将图1-3中的 u 、 i 与时间 t 的关系曲线改画在电流、电压坐标系内，可得具有回环的动态伏安特性，如图1-4所示。由图可见，压降的最大值 U_r 出现在电流的上升部分，但此时电流的值 $I < I_m$ 。据参考文献[2]有

$$U_r = A' I^\alpha + G \left(\frac{di}{dt} \right)_{i=I}^\gamma \quad (1-9)$$

式中的 A' 、 G 、 α 、 γ 是伏安特性拟合时的系数。而通常的静态伏安特性，则是令 $U_r = AI_m^\alpha$ [见式(1-1)]的结果。

考虑到 $\frac{di}{dt}$ 加大， U_r 也加大的影响，我国国家标准^[12]用 $I_m = I_n = 10kA$ ，波形为 $1/5\mu s$

时的残压（分子）与波形为8/20μs时的残压（分母）之比（称为陡波残压系数）来说明阀片对陡波的响应，这一比值一般不大于1.12。

（4）与工频电压下小电流范围内的伏安特性不同，一定温度范围内（20~80℃）电流的温度系数近似为零。 U_r 、 I_m 的关系和图1-4中回环的宽度均与温度无关^[12]。

二、电流响应

阀片在一幅值为 U_0 的脉冲电压（方波或波前为1μs的平顶斜角波）作用下，电流响应的规律性如下所述^{[10]、[11]}。

（1）当外加电压较低时（ $U_0 < U_{1mA,dc}$ ），流过的电流为按指数规律衰减的充电电流，它的起始脉冲值 I_0 随 U_0 的加大而增加。

（2）当外加电压较高时（ $U_0 > U_{1mA,dc}$ ），流过的电流除上述的充电电流外，还有阻性电流。设阻性电流稳定值为 I_r ，当 U_0 加大后， I_r 值加大，电流达 I_r 所需的时延减小。根据试验结果和被试阀片的电气特性，参考文献[13]给出了阻性电流密度 J 随时间 t 的变化规律

$$J(E, t) = KE \left(\frac{E - E_0}{E_0} \right)^m \left\{ 1 - \exp \left[-b \left(\frac{E - E_0}{E_0} \right)^c t \right] \right\} \quad (1-10)$$

式中的 a 、 b 、 c 、 E_0 、 K 、 m （大于1）是由试验结果所得的常数， E 是作用于阀片的电场强度。

第四节 阀片的等值回路

一、概述

由于阀片的等值回路既是以上各节所叙内容的归纳，又是以后进行研究时采用的数学模型的基础，故有说明的必要。但由于问题的复杂性（阀片等值回路中含有依赖于多种影响因素的非线性电阻、电感、电容），故迄今为止，尚无公认的等值回路。

一个可定性地归纳以上各节所述内容的阀片的等值回路如图1-5所示。例如，借助电感 L ，可说明压降峰值出现在电流峰值之前，陡波残压系数大于1等。而借助 C 可说明工频电压作用下有 I_r 及方波或平顶斜角波电压作用时出现的充电电流等；通过 R_1 ，可说明当电流很大时， α 系数将加大等。

但上述等值回路也存在许多问题。主要是一些参数无法准确定值，等值回路过于复杂。

例如 L 就有不同的定值方法。参考文献[10]中取为常数1μH/m；按式（1-9），参考文献[12]取 $L = G \left(\frac{di}{dt} \right)_{i=I}^{\gamma-1}$ ；按参考文献[14]、图1-4， $L = \frac{1}{2} DU / \frac{di}{dt}$ 等。又例如按参考文献[10]，单个阀片的电容在 $\frac{di}{dt}$ 很大、很小时分别取为800pF与1500pF，但 $\frac{di}{dt}$ 的大小，缺乏明确的划分标准。

二、编者的建议

对不包括GIS的电力系统，在分析利用MOA进行过电压防护问题时，暂推荐用非线性

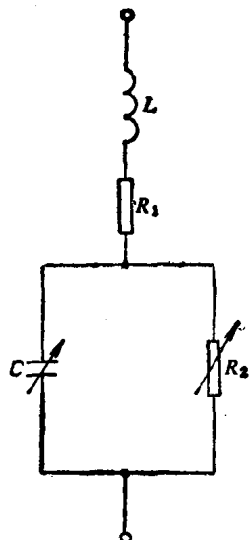


图 1-5 阀片的等值回路

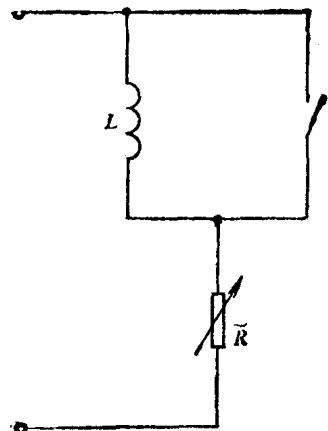


图 1-6 建议用的阀片等值回路

性电阻 \bar{R} 、串或不串（操作过电压时肯定不串）线性电感 L 的等值回路，如图 1-6 所示，非线性电阻之伏安特性按图 1-2 所示的静态伏安特性决定。现说明其理由。

（1）静态伏安特性已考虑了大电流范围内 α 加大的效应，故图 1-5 中的 R_1 可略去。

（2）阀片电容不大（3 个 $\Phi 56 \times 16$ 阀片并联后单位高度的电容，在工频时为 6500 pF/cm ），整只 MOA 的电容更小，除非研究甚高频率的过电压防护问题，略去图 1-5 中的 C 不会带来大的误差。据了解，南非的一个 765 kV 的 GIS，由于着重研究甚高频率下的过电压防护问题，整个 MOA 的等值回路中的 $C = 100 \text{ pF}^{[13]}$ 。

（3）操作过电压下，可略去 MOA 等值回路内的电感，是无可置疑的。因为在求图 1-2 所示的全伏安特性时，试验电流的波前取为 $30 \sim 400 \mu\text{s}$ ，已足够严格（参考文献 [6] 中根据系统大量的实测，取为 $1200 \mu\text{s}$ ）。

（4）雷电过电压下，在 MOA 的等值回路中，如果既按试验电流波形为 $8/20 \mu\text{s}$ 的静态伏安特性来决定非线性电阻，又略去电感，可能带来不应有的偏差。例如，据参考文献 [16]， U_n 为 $110、220、330、500 \text{ kV}$ 的变电站中，流过 MOA 的电流波前值依次为 $0.9 \sim 2.2、1.6 \sim 3.0、1.8 \sim 3.4、1.8 \sim 3.7 \mu\text{s}$ ，其残压将较 $8 \mu\text{s}$ 时高。而据参考文献 [14]，对一经过简化的变电站进行的计算表明，不考虑电感，将使算得的过电压偏低 7%。

我们的计算表明，如串联的电感不大，例如按参考文献 [10] 取 $L = 1 \mu\text{H/m}$ ，则影响很小，MOA 及被保护设备上的过电压无明显变化， t_r 仅略小于 t_r ，但使计算工作量加大不少。为考虑 t_r 小于 $8 \mu\text{s}$ 时残压加大的事实，我们试用了将 $t_r = 8 \mu\text{s}$ 时的伏安特性上抬 4%~5%。但去掉串联电感的等值回路，既可减少计算工作量，又与串联较大电感的计算结果相近（见第四章）。

第五节 金属氧化物避雷器总体的伏安特性

对于单个阀片，在因其截面积过小或待吸收的过电压能量过大时，需要 m 个阀片并联

成组使用；而根据运行电压的要求，又需 n 组阀片串联使用。故MOA有时是由 $n \times m$ 个阀片串、并联组成的。此时需要研究的问题有：工频电压下的电压分布问题；单个阀片与MOA的伏安特性间的关系问题；一组的 m 个阀片之间电流分布是否均匀问题。限于篇幅，在本节中仅对后两个问题作一些简单的说明。

一、单个阀片与MOA总体的伏安特性间的关系

当 n 个阀片（或阀片组，下同）串联组成MOA时，在流过阀片的电流相同时，通常假设MOA的压降为单片压降的 n 倍（如参考文献[17]，为说明此问题，先看一组实测数据。

前苏联500kV系统用的MOA，是用 $\Phi 28 \times 8$ 阀片以18片并联，615组串联组成的。利用4300kV的冲击电压发生器进行实测，得到55组（每组各有3~5个数据，取其平均值）数据，如图1-7所示^[12]。其中曲线1是电流波前为0.3~0.7 μ s时的实测结果。根据同一电流值、波前为0.3~0.7 μ s与波前为8 μ s时的压降比（陡波残压系数），可将曲线1换算得曲线2，曲线3、4分别是工频下的实测结果（曲线3）及其外延（曲线4）。曲线5是根据单个阀片在电流波前为0.3~0.7 μ s时的实测结果，按式（1-3）算得的值。6所表明的4个点，是对该MOA的技术要求，即1200/2500 μ s、1200A下的压降为705kV（下限）、770kV（上限）；8/20 μ s、5kA和10kA下的压降不大于860kV、920kV^[18]，也由实测证实。

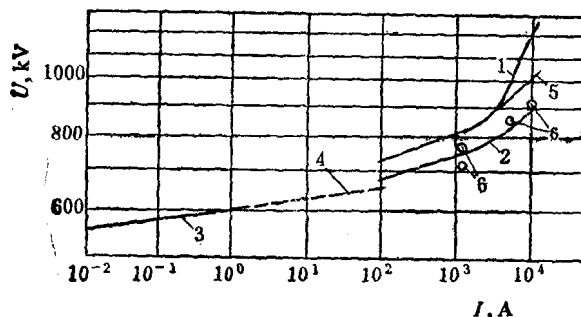


图 1-7 前苏联500kV MOA的伏安特性

考虑到，当电流幅值不变，波形由工频变为波前为8 μ s的非周期性冲击波时，压降将加大3%~4%，曲线3、4上抬4%，则恰可与曲线2衔接。由上述可得出下面的结论。

(1) 根据单个阀片，在不同波形电流流过时的压降之比，由总体的一种实测曲线，换算至另一种情况，误差是很小的。例如根据阀片的陡波残压系数，由实测的曲线1换算得的曲线2，既与上抬4%的曲线3、4相衔接，又与实测到的点值6相符。

(2) 对于曲线1、5，仅当 $I < 3$ kA时，是相符的。这就表明，根据单片的伏安特性，按式（1-3）求MOA的伏安特性时， i 、 $\frac{di}{dt}$ 不能过大，否则将有很大误差。

二、一组 m 个阀片之间电流分布均匀性问题

为简便，令 $m=2$ ，用下标1、2来区分其参数。当总电流为 ΣI ，压降为 U 时，应有

$$\Sigma I = I_1 + I_2, \quad U = U_1 = U_2 = A_1 I_1^{\alpha_1} = A_2 I_2^{\alpha_2}$$

由上式可见, I_1 、 I_2 之比与 A_1 、 A_2 、 α_1 、 α_2 四个参数有关。通常认为, 当阀片特性参数间有分散性时, 可令 $\alpha_1 \approx \alpha_2$ (取为 α), 但 $A_1 \neq A_2$ (对实测数据处理的结果亦表明了这一点, 见本章第六节), 则

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{1/\alpha} = \left(\frac{A_2 I_2^\alpha}{A_1 I_1^\alpha}\right)^{1/\alpha} = \left[\frac{U_{2(I)}}{U_{1(I)}}\right]^\beta \quad (1-11)$$

由式(1-11)可见, 当 β 很大时, 两阀片在电流 I 时的压降 U_1 、 U_2 略有差别, 将使 I_1 、 I_2 有很大的差别。如过载的一个阀片损坏, 将会使MOA的运行可靠性下降。

以西安电瓷研究所试制的500kV MOA为例, 它由3个 $\Phi 56 \times 16$ 的阀片并联组成一组, 298组串联组成。其标称放电电流 $I_n = 10\text{kA}$, 操作冲击放电电流 $I_{op} = 2\text{kA}$ 。组装时, 每片均测量 1mA (dc) 及 $\frac{I_n}{3}$ (这两个电流称为配组电流) 下的压降。如希望在操作冲击电流下 (因此时待吸收的过电压能量大), 电流能近似地均匀分布, 考虑到此时 $m = 3$, 由式(1-11)可见, 最好是根据两阀片在 $I = 666.7\text{A}$ 下的压降、在包括该电流的电流范围内的 β 值、 $\frac{I_1}{I_2}$ 的容许变动范围, 来决定可并联成一组的两阀片压降的容许变动范围。但这将增加试验的工作量。

为此, 现暂取配组电流为 $\frac{I_n}{3}$ 。已知单个阀片的电流在 $100 \sim 500\text{A}$ 范围内, $\alpha = 0.06043$, 则当两阀片中电流差值不超过 ΣI 的10%, 即 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{0.45}{0.55} \sim \frac{0.55}{0.45}$ 时, 由式(1-11)算得, 在配组电流下, U_1 、 U_2 允许的差值约为1%。

对于前苏联应用较多的 $\Phi 28 \times 8$ 阀片, 每片 $I_n = 70\text{A}$, 参考文献[19]中提出, 取配组电流为 $8/20\mu\text{s}$ 、 100A , 但未讲明允许的残压差值。

第六节 阀片伏安特性数据处理与金属氧化物避雷器的数学模型

一、阀片伏安特性数据处理

由于种种原因, 阀片的伏安特性总有一定的分散性。给定试验用电压波形, 给定两个电流值 I_2 、 I_1 ($I_2 > I_1$), 进行 n 次试验, 得到 n 对数据 (U_{2j}, I_2) 、 (U_{1j}, I_1) ($j = 1 \sim n$)。当用式(1-1)来表示伏安特性时, 只对其中的两个量(A 、 α)的平均值及分散性感兴趣。如共有 m 对 (I_2, I_1) , 各对中均进行 n 次测量, 如何根据 $m \times n$ 个数据来建立阀片的全伏安特性, 也是待研究的问题。

(一) 精确的算法

就某一对 (I_2, I_1) 中的 n 对数据 (U_{2j}, I_2) 、 (U_{1j}, I_1) 逐个计算, 可得

$$\alpha_j = \frac{\ln\left(\frac{U_{2j}}{U_{1j}}\right)}{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_j \alpha_j \quad s_\alpha = +\sqrt{D\alpha} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_j (\alpha_j - \bar{\alpha})^2} \quad (1-12)$$