

多层长渡越时间轴向绝缘堆的闪络概率分析*

王 勳, 丁伯南, 谢卫平

(中国工程物理研究院 流体物理研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要: 对基于 J. C. Martin 经验公式的多层长渡越时间轴向绝缘堆的闪络概率分析方法进行了分析与总结。在对比各种类似分析方法优劣的基础上,提出了一种较为成熟的针对多层长渡越时间轴向绝缘堆的闪络概率分析方法,为类似绝缘堆结构的设计提供了理论依据。同时,对其中的不确定因素和存在的问题也进行了较为详细的分析和讨论,为闪络概率分析方法的进一步完善奠定了基础。

关键词: Martin 经验公式; 轴向绝缘堆; 闪络概率; 渡越时间

中图分类号: TL503.3 **文献标识码:** A

多层长渡越时间的轴向绝缘堆的设计对于 Z-pinch 装置及其类似的脉冲功率系统来说至关重要^[1,2],已经成为类似装置研制的一个重点和难点。无论从工程设计还是从物理设计方面,都对绝缘堆的设计提出了许多要求,然而最关键之处在于:如何确定绝缘堆的几何参数和结构,以及在该结构下绝缘堆是否能够工作在我们预期的闪络概率之下。

对于较为简单和面积较小的绝缘体,用常规的 J. C. Martin 经验公式^[3]进行计算和设计已经足够。大量的实验数据也证明了利用 Martin 公式进行设计的可靠性和适用性。然而当我们把该公式推广到多层长渡越时间轴向绝缘堆的设计中时,就会遇到一些问题,这是因为使用的条件已经超出了常规 Martin 公式的适用范围。主要的两个影响因素是:多层绝缘和绝缘环渡越时间。

因此,对于多层长渡越时间轴向绝缘堆闪络概率的分析必须综合考虑上述两个影响因素,这也使得这种情况下的闪络概率分析具有其独特性。本文将在独立考虑上述因素影响的条件下,总结出对于多层长渡越时间轴向绝缘堆闪络概率的分析方法。

1 闪络概率分析的基本理论依据

J. C. Martin 公式^[3]的基本形式如下

$$E_{\max} t_{\text{eff}}^{1/6} A^{1/10} = k \quad (1)$$

式中: E_{\max} 是平均闪络场强电极处的法向分量 (kV/cm), 其值为闪络概率为 50% 的最大工作场强; $t_{\text{eff}} = t_{89\%}$ 为电压有效作用时间 (μs), 等于电压大于 89% 峰值的持续时间; A 为绝缘体表面积 (cm^2); k 为击穿常数 (与材料或其它因素相关)。

如果假设面积为 A 的绝缘体的闪络概率为 p ($p \ll 1$), 则面积增大一个因子 ($1/2p$) 时, 闪络概率将为 $p(1/2p) = 0.5$ 。用 $(A/2p)$ 代替式 (1) 中的 A , 就可以得到闪络概率的表达式^[2]

$$p = 0.5 (Et^{1/6} A^{1/10} / k)^{10} \quad (2)$$

公式 (1) 和 (2) 通常用来描述各种 45 真空界面绝缘体的闪络场强和闪络概率, 适用于单绝缘体和面积 A 在 $10 \sim 40 \text{cm}^2$ 范围以内的绝缘结构。从 (1), (2) 两式可以看出, 影响闪络概率计算的两个关键指数是: 时间依赖指数和面积依赖指数。这两个指数是 J. C. Martin 从最初的原始数据中归纳和推导出来的, 对于多层长渡越时间的情况, 它们不可避免地存在一定的局限性, 因此要将它们应用于所有绝缘结构的分析是不可能的。绝缘层数越多, 闪络击穿场强越高, 因为第 1 层击穿只引起其它层间场强的略微增加。同时, 由于绝缘堆圆周的增大 (即渡越时间的增大), 闪络的情况会变得不同。

在下面的分析中, 将对多层绝缘和绝缘环渡越时间这两个影响因素单独进行考虑, 并得到全堆闪络概率的计算方法。

* 收稿日期: 2003-08-13; 修订日期: 2004-03-18

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 王 勳 (1963—), 男, 博士研究生, 1998 年毕业于清华大学, 从事脉冲功率与高压绝缘技术研究工作; 绵阳市 919-108 分箱; E-mail: caepwm@yahoo.com.cn。

2 多层长渡越时间轴向绝缘堆的闪络概率分析方法^[1]

2.1 忽略渡越时间条件下对多层绝缘堆的闪络概率分析

首先我们假设渡越时间可忽略,即在一层闪络后绝缘堆上新的静电场分布迅速建立。

在脉冲持续时间为 t 时,发生在总面积为 A 的多层绝缘堆某处的第一次闪络概率为 p ,我们可以把公式(2)改写为 $p = 0.5(E/k)^{10/3}A$,则闪络发生于早于 t 时刻的某个时间 t' 的概率可类似地写成 $p_t = p(t'/t)^{5/3}$ 。因此,对时间 t 求导得到 p_t 的概率分布为

$$p_t = \frac{(5/3)p t^{2/3}}{5/3} \tag{3}$$

假定第 1 层闪络发生后,其它面积为 A_2 的未闪络层的场强增加了一个因子 g 。可以合并 A_2 区域的两个场强,即 E 是 t 时刻之前的,而 gE 为 $(t - t')$ 时间的,则有效组合场强 $(E^6 t)_{\text{eff}}$ 由下式给出

$$(E^6 t)_{\text{eff}} = E^6 t + (gE)^6 (t - t') \tag{4}$$

则当第 1 层在时刻 t 发生闪络后,面积 A_2 在脉冲结束前发生闪络的概率可以估计出(用上式代替公式(2)中的场强)

$$p_{2,t} = \frac{1}{2} A_2 [E^6 t + (gE)^6 (t - t')]^{5/3} / k^{10} = \frac{A_2}{A} p [1 + (1 - t'/t) g^6]^{5/3} \tag{5}$$

其中 $t'/t = \alpha$ 。因此第 2 部分发生闪络的全部概率为

$$p_2 = \int_0^1 p_{2,t} p_t dt = (5/3) \frac{A_2}{A} p^2 \int_0^1 [1 + g^6(1 - \alpha)^6]^{5/3} d\alpha \tag{6}$$

或者

$$p_2 = \frac{A_2}{A} p^2 f(g) \tag{7}$$

其中

$$f(g) = (5/3) \int_0^1 [1 + g^6(1 - \alpha)^6]^{5/3} d\alpha \tag{8}$$

在对大型轴向绝缘堆的分析中,通常采用的是(1/4)的时间依赖关系。当把对时间的依赖指数从(1/6)增大为(1/4)时,Martin 公式变化为

$$E_{\text{max}} t_{\text{eff}}^{1/4} A^{1/10} = k \tag{9}$$

则类似上面的推导,可以得到

$$f(g) = (5/2) \int_0^1 [1 + g^4(1 - \alpha)^4]^{5/2} d\alpha \tag{10}$$

图 1^[1]中绘出了 $f(g)$ 的曲线。 g 的最大值通常取 2,这代表了第 1 层闪络后的最坏情况就是它承受的电压全部加在另一层上了。图 1 中也表示了对时间的依赖为 $t^{1/4}$ 的情况。注意到:当 $g = 1$ 时, $f(g) = 1$,此时 $p_2 = (A_2/A) p^2$ 。这一结果表明:如果第 1 层闪络没有引起其它绝缘层间场强的增大,则该处闪络的概率与整个区域的第 1 层闪络概率是相同的,只是乘上了一个面积因子 (A_2/A) 。

对于多层绝缘堆的情况,假设一个绝缘堆有 n 层,每层的面积相等,则对于剩余的独立的 $n - 1$ 层有 $n - 1$ 个独立的 g 值,而且

$$p_2 = \frac{p^2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} f(g_i) \tag{11}$$

同样的处理可以应用到第 3 层闪络概率的计算中,直到得到整个堆闪络概率的场强表达函数。当然计算会变得很复杂,通常用计算机程序来进行处理。本文主要考虑了第 2 层闪络的概率,因为对于 $3 \leq n \leq 6$ 的绝缘堆结构,可以认为两层闪络等效于全堆闪络,即: $p_s = p_2$ 。

由此,可以反推出绝缘堆在闪络概率为 p_s 时应该工作的场强为

$$E_{\text{operate}} = (2p_s)^{0.1} E_{\text{max}} \tag{12}$$

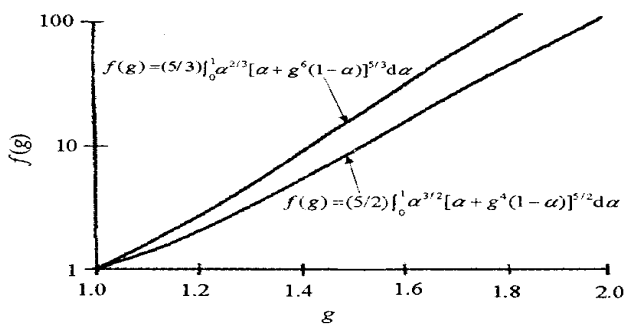


Fig. 1 $f(g)$ as a function of g for $t^{1/6}$ and $t^{1/4}$ time dependence

图 1 $t^{1/6}$ 和 $t^{1/4}$ 依赖下的 $f(g)$ 函数曲线

图 2^[1]给出了 1, 6 和 12 层绝缘在 $t^{1/4}$ 依赖关系下的工作场强与闪络概率间的关系。图 2 表明, 对于各种不同的绝缘堆设计, 预计的平均闪络概率只有百分之几的变化。在某一确定的闪络概率下的工作场强随着绝缘层数的增加而升高。

考虑单层绝缘的情况, 设计为在 95% 的脉冲下能正常运行, 则 $p = 0.05$, 这一单层绝缘体只能运行在由 (1) 式给出的 $(2 \times 0.05)^{0.1}$ 或 80% 的闪络场强比 ($E_{operate}/E_{max}$) 下; 而 6 层和 12 层的绝缘堆可以分别运行在 90% 和 94% 的闪络场强比下。

2.2 考虑长渡越时间影响的分析^[1]

绝缘堆在圆周上某处发生闪络后, 电磁波沿着界面传播一周所需的时间即为渡越时间。对于直径较大的绝缘堆, 它的均压环与水介质有很大面积的接触, 因此其渡越时间很大, 必须考虑渡越时间的影响。首先, 假设所有的均压环上的电磁波传输速度相同。如果 180 圆周的渡越时间与脉冲宽度可比的话, 则当第一次闪络发生后脉冲结束前, 其它区域的层间电压增加得很少, 对于某些区域或许没有增加。同样, 如果闪络独立地发生于不同的绝缘层, 则在脉冲期间它们之间不会发生联系。这些因素都使得整个界面的有效闪络时间延迟。可以把整个绝缘堆等效分割成方位角渡越时间等于电压有效作用时间 t_{eff} 的几个独立模块, 并认为脉冲期间闪络之间的联系发生在模块中而不是在它们之间。然后, 我们把这些模块作为独立的堆进行处理, 并估计同一模块中的闪络概率。具体做法如下:

通过估计绝缘堆的均压环端部对水介质的电容量, 能估算出电磁波的传播速度约为 $v = mc$ 。由此在整个绝缘堆的圆周 C 上, 渡越时间约为 $t_{tr} = C/v$ 。而设外加电压脉冲的有效作用时间 (在对时间的 $t^{1/4}$ 依赖条件下, 对应于峰值电压的 85%) 为 t_{eff} 。则可以把整个绝缘堆分成几个渡越时间等于 t_{eff} 的堆进行考虑, 共可分为 $w = t_{tr}/t_{eff}$ 个独立的堆。

上面已经推出, 对于每个堆发生二次闪络的概率为 p_2 。考虑一个设定的全堆闪络概率 p_s , 则对于一个模块的闪络概率应为 p_2 , 可以得到

$$p_2 w = \frac{p_s^2}{n} \prod_{i=1}^{n-1} f(g_i) \tag{13}$$

对于整个绝缘堆来说, 工作场强水平仍由式 (12) 决定。即: 对于大尺寸的绝缘堆, 不考虑渡越时间影响时的全堆闪络概率比考虑渡越时间影响时增大了 w 倍。

3 分析举例

3.1 SATURN 绝缘堆^[1]

考虑 SATURN 的绝缘堆, 它的剖视图如图 3^[1]所示。16 个绝缘层分成两组 (每组 8 层) 分别位于高电位电极的两侧。在大的盆腔中段平面, 利用场分布调整结构 (图中的 flux excluders) 使得每一组的两侧 4 个绝缘层的电压分布均匀。因此, 我们只考虑包含 4 个绝缘层的一组绝缘堆。

通过估计 4 层绝缘堆的均压环对端部的电容量, 得到电磁波速度约为 $0.2c$ 。由此在大约 5m 的圆周

上, 暂态时间约为 100ns。而 SATURN 装置电压脉冲的有效作用时间 (测量值的 85%, 适于对时间的 $t^{1/4}$ 依赖性) 为 18ns, 这对应于整个堆可以分成 $w = 100/18 = 5.56$ 个模块。如果我们令 p 等于发生在整个堆任何地方的一次闪络概率, 则发生在同一模块的二次闪络的概率可以从式 (13) 推出

$$p_2 = \frac{1}{w} \frac{p_s^2}{16} \prod_{i=1}^3 f(g_i) \tag{14}$$

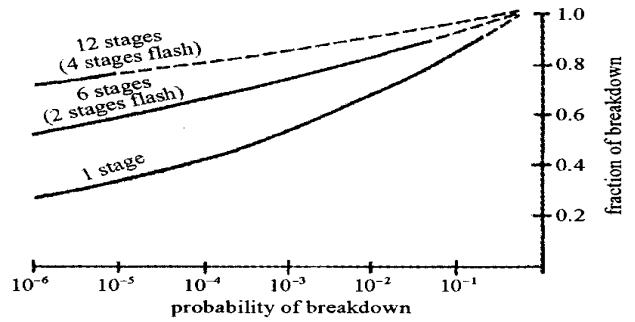


Fig. 2 Relationship between fraction and probability of breakdown with 1, 6 and 12 stage vacuum insulator stack

图 2 在 1, 6 和 12 绝缘情况下的工作场强与闪络概率的关系

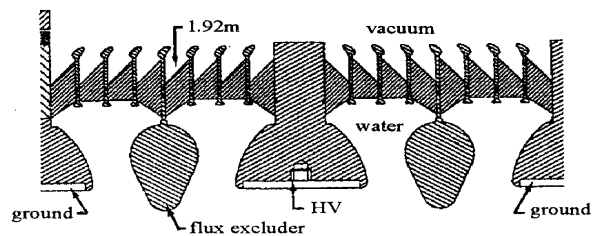


Fig. 3 SATURN vacuum interface module (one of three)

图 3 SATURN 装置绝缘堆剖视图

从场分布模拟可以估计出,端部绝缘层闪络导致 g 值为 1.62,1.24 和 1.14,从图 1 中 $t^{1/4}$ 的依赖关系可以得到 $p_2 = 0.23 p_1^2$;而中间层闪络导致 g 值为 1.44,1.41 和 1.15,且 $p_2 = 0.16 p_1^2$ 。取其平均值为 $p_2 = 0.20 p_1^2$ 。如果希望 SATURN 运行在每一个模块有 10% 闪络概率的电压水平下,即允许 $0.20 p_1^2 = 0.1$ 或者是 $p_1 = 0.7$,则整个模块能运行在 $(2 p_1)^{0.1} = 103.5\%$ 的 Martin 场强下。事实上,SATURN 可以安全地工作在 110% 的闪络场强比下(即最大到 4MV),两者间有 7% 的偏差,可见上述分析的结果并不理想。

3.2 Z 装置绝缘堆^[2]

作为例子,同样计算了 Z 装置的绝缘堆(5 层)在 10% 闪络概率下的 Martin 运行水平。

表 1 5 层堆一次闪络后的过电压分布

ring flashing	voltages ratio on rings in sequence, g				
end	0	1.57	1.21	1.13	1.09
next to end	1.39	0	1.36	1.15	1.10
middle	1.14	1.36	0	1.36	1.14

首先,估计了不同层间闪络的影响。表 1^[2]给出了某层闪络后其它层间的过电压因子 g ,其中的零值代表闪络的环,其它值表示电压的增加。并假设该影响对于绝缘堆的中心平面对称的。则第二次闪络的概率 p_2 可以用 A,B 堆中 10 个绝缘层中发生一次闪络的概率 p_1 表示出来。利用图 1 中 $t^{1/4}$ 的依赖关系可以得到 $f(g)$ 值。则有

$$p_2 = \frac{p_1^2}{10} \quad f(g) = \frac{p_1^2}{10} (13.0 + 2.2 + 1.5 + 1.3) = 1.8 p_1^2 \quad (15)$$

(15) 式即为端部环间闪络的情况;对于相邻的环间闪络有 $p_2 = 1.27 p_1^2$;对于中间环间闪络有 $p_2 = 1.22 p_1^2$ 。取加权平均值为 $p_2 = 1.47 p_1^2$ 。

然后,考虑渡越时间的影响。由于绝缘环直径为 2.8m,且沿均压环的波速大约为 $c/5$ 。所以整个圆周的渡越时间约为 172ns。而 t_{eff} 约为 55ns。可以把全堆考虑成由多个渡越时间为 55ns 构成的模块,则每个堆有 $w = 172/55 = 3.13$ 个模块,两个堆共有 6.25 个。考虑 1/10 的闪络概率,且在一个模块中发生两层闪络的情况,则对于一个模块的闪络概率约为 $1/62.5$ 。因此对于一个 5 层堆,有 $1.47 p_1^2 = 1/62.5$ $p_1 = 0.104$,这对应于工作场强比为 $(2 p_1)^{0.1} = 85.5\%$ 。对于整个堆的全周长,工作场强比为 $0.855 \times 6.25^{0.1} = 102.7\%$ 。

因此,把两个 5 层堆一起考虑,在运行于用公式(1)估计的闪络场强下,渡越时间的影响使场强增加了一个因子 $3.13^{0.05} = 1.06$ 。如果忽略该影响,则需运行在 97% 的场强比下。如果同样忽略多层绝缘的影响,则要想达到 0.1 的闪络概率,必须运行在 $(2 \times 0.1)^{0.1} = 85\%$ 的场强比下。

4 分析方法中的不确定因素和存在的问题

对于多层绝缘堆闪络概率的分析,一层闪络后过电压因子 g 的准确计算是非常重要的。作为例子在表 1 中给出的过电压因子 g 是在考虑各绝缘环间电容量的条件下,通过暂态分析计算得到的。然而,正是由于 g 值是通过暂态分析得到的,则采用怎样的电路模型和在那一个时刻取值仍是不确定的。

如果一个多层绝缘堆层间电压分配是线性的,且均匀度在 $\pm f$ 的范围内(f 代表与平均场强的比例),则可以得到绝缘堆的第一次闪络的概率减少了一个因子 $1 - (n - 1) f^2/6$,其中 n 是闪络概率分布的面积(或 Weibull 指数,通常由(1)式取为 10。在 $f = 0.065$, $n = 10$ 时,这个减少量约为 0.6%。这是在设计多层绝缘堆结构时应该注意的问题。

另一个显然的问题是能否将 $A^{0.1}$ 的结果外推至面积大于 10^5cm^2 的绝缘堆。J. C. Martin 应用 0.1 的面积指数是基于“单次实验的 10% 抖动”的假设,而不是对不同面积的比较。Shannon 和 DiCapua^[4]更为详细的研究了 75cm^2 绝缘体闪络的概率分布,发现结果更符合 Weibull 分布,从而推导出面积指数为 1/8。如果考虑单次实验间的变化,则面积指数将更大一些。综合起来考虑,面积指数最好是大于 0.1;但是对于面积不大于 1000cm^2 的情况,面积指数应该是不大于 0.1。因此,一般说来,公式(1)在大面积条件下估计出的结果是比较悲观的。

在前面讨论的 SATURN 绝缘堆的设计中,用的是 $1/4$ 假设。在把 SATURN 的结果外推到脉冲长 $3 \sim 4$ 倍的 PBFA-II Z 装置时同样应用了 $1/4$ 的时间依赖假设。比 $1/6$ 更强的对时间的 $1/4$ 指数依赖关系在 J. C. Martin 的文献[3]中被推导出来。而 T. H. Martin 等人提出建议:类似于液体击穿,真空闪络对时间的依赖可以用 $1/3$ 的指数关系来描述。实际的时间依赖性(特别是对于大面积绝缘情况)仍有一些不确定性。

5 结 论

与常规的小面积单绝缘体不同,对于多层长渡越时间轴向真空绝缘堆的闪络概率分析具有其独特性,重要的两个影响因素是多层绝缘和沿绝缘环圆周的渡越时间。本文在分别考虑这两个影响因素的基础上,选取合适的面积因子和时间因子,推导出大尺寸绝缘堆整体的闪络概率分析方法和相应计算公式。将该分析方法应用于国外绝缘堆实例的计算中,得到了绝缘堆的实际工作场强。同时,也指出了该分析方法中的不确定因素和存在的问题。

参考文献:

- [1] Smith I. Flashover of vacuum interfaces with many stages and large transit times[A]. Proc 5th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Arlington, Virginia, USA, 1985. 558—567.
- [2] Smith I D, Corcoran P A. Design criteria for the Z vacuum insulator stack[A]. Proc 11th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Baltimore, Maryland, USA, 1997. 168—176.
- [3] Martin J C. Fast pulse vacuum flashover[R]. AWRE Note SSWA/JCM/ 713/ 157, 1971.
- [4] DiCapua M S. A statistical interpretation of the J. C. Martin relationship for breakdown of insulators in vacuum[A]. Proc 5th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Arlington, Virginia, USA, 1985. 306—310.
- [5] Stygar W A, Spielman R B. Operation of a five-stage 40,000-cm²-area insulator stack at 158kV/cm[A]. Proc 12th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Monterey, California, USA, 1999. 454—457.
- [6] Sullivan T S, Ashby S R. A cast-gradient-ring, racetrack-shaped, magnetic-flashover-inhibited insulator[A]. Proc 3th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Albuquerque, New Mexico, USA, 1981. 252—255.

Flashover probability analysis of vacuum insulator stack with many stages and large transit time

WANG Meng, DING Bo-nan, XIE Wei-ping

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on Martin equation, the paper summarizes the calculation method of flashover probability of vacuum insulator stack, which has many insulator stages and large azimuthal transit time, under a given voltage waveform. $1/4$ power time dependence and $1/10$ power area dependence are chosen in analysis. Then the flashover probabilities of vacuum insulator stack of SATURN and Z machine are calculated as examples. The theoretical criteria for similar vacuum insulator stack design are offered. The paper also detailedly discusses the uncertain factors and existent questions, and establishes the base for further optimizing of the analysis methods.

Key words: Martin formula; Vacuum insulator stack; Flashover probability; Transit time