文章编号: 1001-4322(2011)09-2542-05

# 考虑磁场闪络抑制效应的真空绝缘堆闪络概率计算

李 逢, 王 勐, 王传伟, 何 勇, 陈 林, 邹文康

(中国工程物理研究院 流体物理研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要: 基于统计学闪络经验公式,计算绝缘堆闪络概率,结果显示:绝缘堆电压峰值越低、电压有效作用时间越短、材料常数越小,则闪络概率越低;在一定绝缘堆电压范围内,绝缘堆半径越小,闪络概率越低。考虑磁场闪络抑制效应,计算了绝缘堆闪络概率。通过电场强度与磁感应强度之比得到磁场开始闪络抑制作用的临界比值。根据绝缘体与电极的夹角以及阴极三相点电场强度与平均电场强度的关系,得到不同的临界比值,比较闪络概率计算结果的差异。计算结果表明:在磁场闪络抑制效应作用下,绝缘堆闪络概率下降。

关键词: 真空; 绝缘堆; 闪络概率; 磁场闪络抑制效应; 统计学闪络经验公式

中图分类号: TM835.4 文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20112309.2542

在真空间隙中,不可避免地引入固体绝缘材料,会出现材料表面发生闪络的现象,导致系统绝缘失败[1]。大型脉冲功率装置(如 Z 装置[2])中,真空界面在百 ns 的时间内,传输功率达到几十 TW。传输如此大的功率所带来的绝缘可靠性问题不容忽视。真空绝缘堆是当今脉冲功率装置功率传输效率能否达到最大的瓶颈所在,它的结构设计需符合多项要求<sup>[3]</sup>,主要包括:在阳极上设计凹入结构以降低阳极三相点场强;把均压环伸出绝缘体边沿以屏蔽电子和真空紫外线;绝缘体和金属均压环间的良好接触以及各层绝缘之间的电压分配均匀度小于 10%等。如何最大限度挖掘绝缘堆绝缘潜力是其物理设计的关键。磁场闪络抑制(MFI)效应[46]是指当磁场的位形有利于电子离开绝缘体表面时,磁场达到临界值,电子在洛仑兹力作用下偏离原运动轨迹,不撞击绝缘体表面,达到绝缘目的。磁场效应在磁绝缘传输线中得到了应用[7],但真空绝缘堆物理设计尚未考虑其影响情况。本文根据已确定的绝缘堆参数,基于统计学闪络经验公式计算绝缘堆闪络概率[8],分析了绝缘堆电压峰值、电压有效作用时间、材料常数和绝缘堆半径对闪络概率的影响,计算时考虑了 MFI 效应影响时的真空绝缘堆闪络概率,讨论了电场强度与磁感应强度的临界比值对闪络概率计算的影响。

#### 1 基于统计学闪络经验公式的绝缘堆闪络概率计算

#### 1.1 统计学闪络经验公式计算全堆闪络概率

标准 45°真空固体绝缘界面的统计学闪络经验公式为

$$\gamma_{\text{SM}} = \frac{E_{\text{p}} (t_{\text{eff}} C)^{1/\beta}}{\exp(\lambda/d)} \tag{1}$$

式中: $\gamma_{SM}$ 为材料常数; $E_P$  为绝缘堆平均电场强度最大值; $t_{eff}$ 为有效脉冲宽度;C 为绝缘体周长;d 为绝缘体高度; $\lambda,\beta$  为常数。 $t_{eff}$ 也是电压有效作用时间,为

$$t_{\text{eff}} = \frac{1}{E_p^{\beta}} \int_0^t E^{\beta}(t) \, \mathrm{d}t \tag{2}$$

式中: E(t) = V(t)/d,V(t) 为绝缘体两端电压。根据统计学闪络经验公式,可得到绝缘堆闪络概率为

$$F(t) = 1 + \sum_{i=1}^{n} a_{i} \exp[-(n+1-j)h_{j,\text{eff}}^{\beta}R]$$
(3)

式中:n 为单层绝缘堆中绝缘环总个数;j 为单层绝缘堆中某一层绝缘环数。计算系数  $h_{j,\text{eff}}$ 考虑了圆周渡越时间与绝缘环间电压分配不均匀性对绝缘堆闪络概率计算的影响[9-11],由此计算得到绝缘堆闪络概率更加准确;而 R 为系数,有

$$R = \frac{\ln 2E_{\rm p}^{\beta} t_{\rm eff} C}{\left[\gamma_{\rm SM} \exp(\lambda/d)\right]^{\beta}} \tag{4}$$

<sup>\*</sup> 收稿日期:2010-12-24; 修订日期:2011-04-08

#### a<sub>n</sub> 从下面表达式得出

$$G \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$G_{ij} = \left[ (n+1-j)h_{j,\text{eff}}^{\beta} \right]^{i-1} \tag{6}$$

基于统计学闪络经验公式的绝缘堆闪络概率计算方法如图 1 所示。

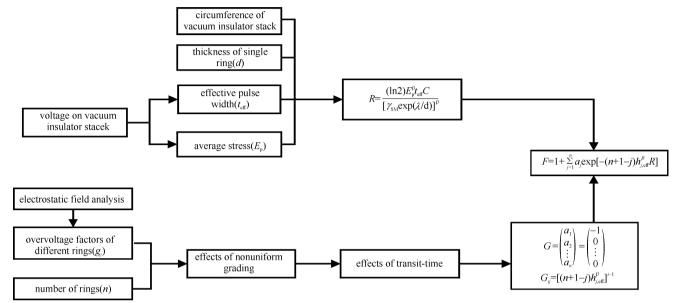


Fig. 1 Insulator stack flashover probability calculation method based on statistical empirical model

图 1 基于统计学闪络经验公式的全堆闪络概率计算方法

#### 1.2 不同因素对绝缘堆闪络概率影响

在绝缘堆设计中,首先初步确定工作电压,由不同平均工作场强确定相应的绝缘堆高度,分别计算真空区电感、绝缘堆上的电压、电流及实际工作场强。几组数据比较,选取合适的绝缘堆模型进行静电场分析和闪络概率的计算。闪络概率计算值偏大时,调整绝缘堆结构。

本文绝缘堆的相关参数:绝缘堆电压  $14.8~\mathrm{MV}$ ,负载电流峰值  $70.5~\mathrm{MA}$ ,绝缘堆层数  $6~\mathrm{E}$ ,单层堆高度  $1.2~\mathrm{m}$ ,每层包括  $8~\mathrm{C}$  个绝缘环和  $7~\mathrm{C}$  个均压环,绝缘堆半径  $3.2~\mathrm{m}$ ,真空区电感  $20~\mathrm{nH}$ ,平均电场强度  $123~\mathrm{kV}$  · cm $^{-1}$ 。绝缘堆结构如图  $2~\mathrm{fm}$  示。绝缘堆闪络概率达到 17.16%。绝缘堆电压峰值、电压有效作用时间、材料常数和绝缘堆半径对计算闪络概率的影响如图  $3~\mathrm{C}$  6 所示。由图可见绝缘堆电压峰值

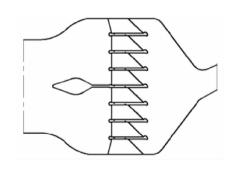


Fig. 2 Configuration of insulator stack 图 2 绝缘堆结构图

越低,电压有效作用时间越短,材料常数越大,绝缘堆闪络概率越低;在一定电压范围内,绝缘堆半径越小,闪络概率越低。

## 2 考虑磁场闪络抑制效应的绝缘堆闪络概率计算

#### 2.1 磁场闪络抑制效应

真空沿面闪络过程中,电子撞击绝缘体表面是形成闪络的重要原因。在绝缘体表面施加外加磁场,在MFI 效应的作用下电子远离绝缘体表面。MFI 效应对电子运动轨迹的影响原理如图 7 所示。电流流过电极时,在绝缘堆附近产生磁场。当磁场足够大时,电子运动会远离绝缘介质表面。真空绝缘子沿面闪络机理SEEA 假说[12]中提到,电子撞击绝缘子表面产生二次电子发射,导致电子倍增并使绝缘子表面吸附气体层解吸附,最终形成沿面闪络。MFI 效应避免电子撞击绝缘堆表面,从而降低了绝缘堆闪络概率。但多大的磁场使电子离开绝缘表面是未知的,经验公式中电场强度与磁感应强度的比值作为 MFI 效应的判据[13]。

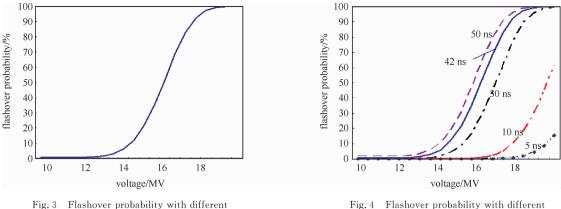
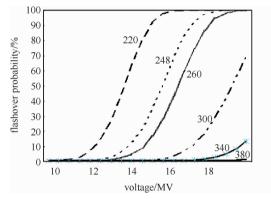


Fig. 3 Flashover probability with different peak values of stack voltage

effective pulse durations 图 3 不同电压峰值的闪络概率 图 4 不同电压有效作用时间的闪络概率



Flashover probability with different material constants 图 5 不同材料常数的闪络概率

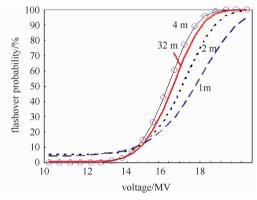


Fig. 6 Flashover probability with different radii of stack 图 6 不同绝缘堆半径的闪络概率

当绝缘体与电极夹角为 0°时,磁场判据公式为

$$\frac{E_{\text{CTP}}}{cB} \leqslant 0.07 \tag{7}$$

式中: $E_{CTP}$ 是阴极三相点处电场强度;c是光速;B是磁感应强度。 当绝缘体与电极夹角为 45°时,磁场判据公式为

$$\frac{E_{\rm av}}{cB} \leqslant 0.056 \tag{8}$$

式中: $E_{xx}$ 是平均电场强度。平均电场强度与磁感应强度的比值 小于临界比值时,磁场开始闪络抑制作用。抑制作用表现为绝缘 材料常数变为原材料常数的1.5倍。

# 2.2 两段法计算真空绝缘堆闪络概率

真空绝缘堆的结构为轴向堆栈式,磁场判据不能完全符合 0°

或  $45^{\circ}$ 的判据,需要综合考虑两种情况。绝缘堆设计指标中, $E_{\rm CTP}$ 必须小于  $30~{\rm kV/cm}^{[14]}$ 。绝缘堆  $E_{\rm av}$ 为 123kV/cm, 当  $E_{CTP}$  为 30 kV/cm, 约为  $E_{av}$  的 1/4, 则式(7) 变为

away from vacuum insulator surface

Principle of MFI caused electron movement

图 7 MFI 效应对电子运动轨迹影响原理

$$\frac{E_{\text{av}}}{cB} \leqslant \frac{0.07}{0.4} = 0.175 \tag{9}$$

绝缘堆上电压与电流达到峰值的时间是不同的,电压到达峰值时间快于电流到达峰值时间,如图 8 所示。 通过电压得到平均电场强度,通过电流得到磁感应强度。达到闪络抑制作用的磁感应强度时间滞后于电 压起始作用时间,因此电压有效作用时间可以分割为两段,一段是磁场闪络抑制之前的电压作用时间  $t_{eff}$ ,一 段是磁场闪络抑制时的电压作用时间 teff 。根据电压作用时间的两段性,可以得到两段绝缘堆闪络概率

$$F(t) = f(\gamma_{\text{SM1}}, t_{\text{eff1}}, \cdots) + f(\gamma_{\text{SM2}}, t_{\text{eff2}}, \cdots)$$

$$\tag{10}$$

当 MFI 效应作用时,绝缘堆闪络几率接近 0,可忽略不计。因此绝缘堆闪络概率仅考虑 MFI 效应作用之

前的闪络概率。由于真空绝缘堆结构的特殊性,对多种磁场闪络抑制效应判据进行计算时,主要考虑了绝缘体与电极夹角以及阴极三相点处电场强度与平均电场强度的关系。计算结果如表1所示。根据表1可知,任意临界比值条件下,考虑 MFI 效应的绝缘堆闪络概率都低于不考虑 MFI 效应时的绝缘堆闪络概率。由图 9 可

知,随临界比值增大,闪络概率降低。闪络概率降低速率开始较快,随后变缓,最后在某些临界比值的条件下达到最低。当绝缘体与电极夹角为 45°时,绝缘堆绝缘能力挖掘潜力有限,但绝缘体与电极夹角为 0°、并考虑阴极三相点电场强度与平均电场强度的关系时,绝缘堆绝缘能力挖掘潜力很大。因此还需要更多的实验来寻找真正的临界比值。

表 1 不同判据下的全堆闪络概率计算

Table 1 Probability of stack flashover with different critical ratios

critical ratio of MFI	probability without effect of MFI/ $\%$	probability with effect of MFI/ $\%$
0.056 0	17. 16	15.34
0.350 0	17.16	~
0.230 0	17.16	~
0.175 0	17.16	~
0.140 0	17.16	0.13
0.117 0	17.16	1.13
0.100 0	17.16	3.55
0.087 5	17. 16	6.63

<sup>\*</sup> the flashover probabitlity is very small, approximately equal to zero.

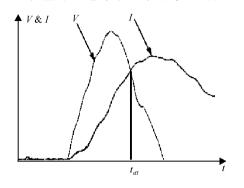


Fig. 8 Voltage and current on stack 图 8 绝缘堆电压与电流

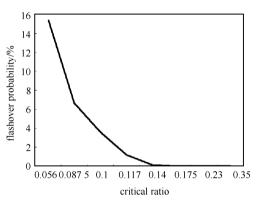


Fig. 9 Relation between critical ratio and flashover probability

图 9 临界比值与闪络概率的关系

### 3 结 论

本文在给定绝缘堆参数的基础上,根据统计学模型闪络经验公式计算绝缘堆闪络概率,分析得到:电压峰值越低,电压有效作用时间越短,材料常数越大时,绝缘堆闪络概率越低,绝缘堆半径对闪络概率的影响不是线性关系。重点计算了考虑 MFI 效应的绝缘堆闪络概率,计算结果低于不考虑 MFI 效应时的绝缘堆闪络概率,分析了平均电场强度与磁感应强度比值的变化对计算闪络概率的影响。由于没有确切的临界比值,评估 MFI效应对绝缘堆闪络概率的影响还需要更多的实验验证。

#### 参考文献:

- [1] 张冠军,赵文彬,郑楠,等. 真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展[J]. 高电压技术, 2007, **33**(7): 3-8. (Zhang Guanjun, Zhao Wenbin, Zheng Nan, et al. Research progress on surface flashover phenomena across solid insulation in vacuum. *High Voltage Engineering*, 2007, **33** (7): 3-8)
- [2] Stygar W A, Spielman R B, Anderson R A, et al. Operation of a five-stage 40 000 cm<sup>2</sup>-area insulator stack at 158 kV/cm[C]//International Pulsed Power Conference, 1999;454-457.
- [3] Smith I. Flashover of vacuum interfaces with many stages and large transit times[C]//International Pulsed Power Conference. 1985: 558-567.
- [4] VanDevender J P, McDaniel D H, Bergeron K D, et al. Magnetic inhibition of insulator flashover[J]. J Appl Phys, 1982, 53(6):4441-4447.
- [5] Bergeron K D, Mcdaniel D H. Magnetic inhibition of surface flashover of insulators in vacuum[J]. Appl Phys Lett , 1976, 29(9):534-536.
- [6] Benwell A, Kovaleski S D. Insulator breakdown tests preceding a study on magnetic flashover inhibition[C]//IEEE Pulsed Power Conference, 2005;1151-1154.
- [7] Di Capua M S. Magnetic insulation[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1983, 11(3):205-215.

- [8] Stygar W A, Ives H C, Wagoner T C, et al. Flashover of a vacuum-insulator interface: A statistical model[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2004.7:070401.
- [9] 王勐,丁伯南,谢卫平. Z-pinch 装置轴向绝缘堆的设计和分析方法[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(9):1199-1203. (Wang Meng, Ding Bonan, Xie Weiping. Design and analysis methods of vacuum insulator stack of Z-pinch device. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,16 (9):1199-1203.)
- [10] 王勐,丁伯南,谢卫平. 多层长渡越时间轴向绝缘堆的闪络概率分析[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(7):934-938. (Wang Meng, Ding Bonan, Xie Weiping. Flashover probability analysis of vacuum insulator stack with many stages and large transit time. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,16(7):934-938)
- [11] 王勐,关永超,宋盛义,等. PTS 装置分层真空轴向绝缘堆设计[J]. 强激光与粒子束,2010,22(4):777-781. (Wang Meng, Guan Yongchao, Song Shengyi, et al. Design of PTS vacuum insulator stack. *High Power Laser and Particle Beams*,2010,22(4):777-781)
- [12] Anderson R A, Brainard J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption[J]. J Appl Phys, 1980, 51 (3):1414-1421.
- [13] Savage M E, Stygar W A, Elizondo J M, et al. Effect of self-magnetic field on large pulsed insulators operated at 4 megavolts and 5 megaamperes[C]//IEEE Power Modulator Symposium. 2004;54-59.
- [14] Shoup R W, Long F, Martin T H, et al. Design validation of the PBFA-Z vacuum insulator stack[C]//IEEE Pulsed Power Conference. 1997;1608-1613.

# Calculation of vacuum insulator stack flashover probability considering magnetic flashover inhibition

Li Feng, Wang Meng, Wang Chuanwei, He Yong, Chen Lin, Zou Wenkang (Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The flashover probability of vacuum insulator stack (VIS) is calculated based on statistical model. The calculation results show that the probability reduces with lower peak voltage of VIS, shorter effective pulse duration, smaller material constant and smaller stack radius in a certain range of VIS voltage. The flashover probability is also calculated with the consideration of magnetic flashover inhibition (MFI) under different critical ratios. The critical ratio is defined as the ratio of electric field strength to magnetic induction strength when MFI begins to be effective, and is changed according to different angles between insulator and electrode considering the relation of the three-phase point electric field strength of cathode and the average electric field strength of VIS. The simulation results indicate that the flashover probability is reduced by the effect of MFI.

Key words; vacuum; insulator stack; flashover probability; magnetic flashover inhibition; statistical model