

沿面闪络开关研究进展

潘如政^{1,2}, 孙广生², 严萍², 王珏², 张东东²

(1. 河北工业大学电气与自动化学院, 天津 300130; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要: 在脉冲功率系统中, 开关是最为关键的部件之一。笔者综述了脉冲功率中应用的沿面闪络开关的研究成果。介绍了沿面闪络开关的结构、研究现状、绝缘介质和电极材料, 并介绍了近年来出现的激光沿面闪络开关的可能机理。最后, 指出对窄脉冲电压下的激光沿面闪络开关, 激光脉冲与电压脉冲的同步是一个很关键的问题, 有待深入研究。

关键词: 脉冲功率; 沿面闪络开关; 闭合开关; 激光触发

中图分类号: TM89

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0111-04

Progress in the Research of Surface Flashover Switch

PAN Ru-zheng^{1,2}, SUN Guang-sheng², YAN Ping², WANG Jue², ZHANG Dong-dong²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The switch is one of the most important elements of the pulsed power system. This paper summarizes the relevant research of surface flashover switch. Then the author respectively introduces the structure of the switch, dielectric, status quo of research, insulation, electrode materials and mechanism of laser-triggered surface flashover switch developed in recent years. Finally, the paper puts forward the prospect of laser-triggered surface flashover switch.

Key words: pulsed power; surface flashover switch; closed switch; laser triggered

0 引言

在脉冲功率系统中, 开关是最为关键的部件之一。脉冲功率系统中常用的闭合开关有三电极开关、场畸变开关、伪火花开关、半导体开关、磁开关和沿面闪络开关等^[1-3]。三电极开关、场畸变开关和伪火花开关通流能力强, 但使其开关时延和抖动较小比较困难; 半导体开关在重复频率上有优势, 但它的通流能力及耐压能力比较低; 磁开关可以重复频率使用, 但其在闭合速度上处于劣势; 沿面闪络开关^[4]具有结构简单、可以精确控制触发、开关抖动低、工作范围宽、容易实现多通道放电从而获得低开关电感等优点, 闪络开关还有一个重要的优点是它可以集成在脉冲功率装置的部件之上(如脉冲形成线、变压器等), 实现设备一体化和紧凑性, 为设备的小型化提供基础。笔者介绍了典型沿面闪络开关的结构、研究现状、绝缘介质和电极材料, 并介绍了近年来出现的激光沿面闪络开关可能机理。

1 沿面闪络开关

沿面闪络开关是利用介质表面贯穿性电击穿

(沿面闪络)来闭合的脉冲功率用开关, 其可以放置在气体环境下, 也可以放置在真空环境下。沿面闪络开关可在自击穿模式和触发模式下工作。自击穿模式沿面闪络开关是在开关上施加电压, 造成电极间过电压击穿, 开关闭合。触发模式沿面闪络开关主要有电脉冲触发沿面闪络开关和激光脉冲触发沿面闪络开关两种形式。电脉冲触发沿面闪络开关是在开关上施加相应的工作电压, 然后通过触发电极施加触发脉冲使电场畸变引起闪络, 开关闭合; 激光脉冲触发沿面闪络开关是在开关上施加相应的工作电压, 然后通过激光脉冲辐照介质表面, 触发介质闪络使开关闭合。

2 典型沿面闪络开关的结构

国内外有关研究的沿面闪络开关形状各异, 可归结为几种典型的沿面闪络开关结构^[5-8], 见图 1。图 1 中, 1 和 2 分别为开关的两个电极, 在两个电极上施加所需要的相应电压; 3 为开关的电脉冲触发电极, 在此电极上施加电脉冲来触发开关闭合; 4 为开关的绝缘介质, 在绝缘介质的闪络面上发生闪络表示开关闭合; 5 为开关的绝缘支撑, 用于对开关的

收稿日期: 2008-12-05; 修回日期: 2009-03-12

作者简介: 潘如政(1977), 男, 博士, 从事脉冲功率及高电压技术等方面的研究。

组装;6为开关的激光触发脉冲方向,将激光脉冲辐照在开关绝缘介质的闪络面上来触发开关闭合。图1(a)、(b)为平面结构的电脉冲触发沿面闪络开关,适用于带状传输线;图1(c)、(d)为同轴结构的电脉冲触发沿面闪络开关,适用于同轴传输线;图1(e)为激光触发的平板电极沿面闪络开关。根据不同的应用场合,安装不同形式的闪络开关。

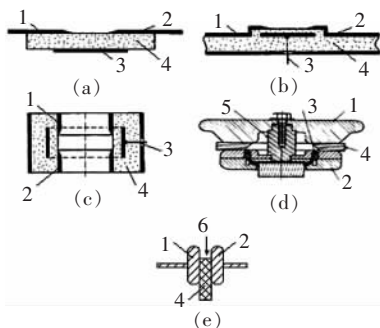


图1 典型沿面闪络开关结构图

3 沿面闪络开关研究现状

沿面闪络开关作为低开关电感和低抖动开关应用于高压脉冲系统中已有近50年的历史。沿面闪络开关的开关电流可达几兆安^[9],开关抖动可小到100 ps^[10]。1976年Hasson及1978年Zaraslov还将沿面闪络开关作为预电离源应用于高压气体激光器之中^[11,12]。

1961年Looms首次报道了直流电压下的电脉冲触发沿面闪络开关,开关的触发电极是一根细导线,开关间隙在玻璃管的外壁上,开关的能量较小^[4]。1967年Fearn和Wooding研究了可用于带状传输线的电脉冲触发沿面闪络开关^[13],开关具有低电感和结构简单等优点。沿面闪络开关电感和电阻分别为10 nH和14 mΩ,开关的工作电压为5~20 kV,平均开关时延为35 ns,抖动小于25 ns。

1976年Grigor'ev和1981年Belyaev报道了宽度为400 mm、开关电流高达2 MA、电压为100 kV的电脉冲触发多通道沿面闪络开关^[4],开关工作在大气环境下,开关时延150 ns,抖动为20 ns。1982年Bergmann应用电极间隙为5~10 mm、工作在高压下的多通道沿面闪络开关来激发高压准分子激光器,开关长度为300 mm,开关电压为50 kV,开关电流为50 kA,开关时延小于5 ns及具有亚纳秒的抖动。1986年Curry对不同介质表面的触发及多通道特性进行了研究^[14],给出了环氧玻璃纤维板、聚甲醛树脂和有机玻璃的参数特性。1985年Pai和Marton对几种结构的触发电极对介质闪络的影响进行了试验研究和理论分析^[15],给出了非均匀电场中开关性能取决于触发电极形状、触发电极位置和空间电荷分布的结论。

1991年Kellogg报道了电脉冲触发真空沿面闪络开关^[5],开关触发电压为5 kV,绝缘材料为聚亚胺酯,工作电压范围在22~45 kV,开关在30 kV时开关的时延为320 ns,抖动为50 ns,电流峰值为1 MA。同年,Earley报道了开关操作电压为3 kV、自击穿电压为4 kV的电脉冲触发沿面闪络开关^[16],开关寿命为100次,峰值电流为5 kA,开关能量转移为1 J,触发电压为-6 kV。表1给出了开关在不同间隙电压下的开关时延和开关抖动。

表1 开关的开关时延和开关抖动

间隙电压/kV	开关时延/ns	开关抖动/ns
2.5	未触发	未触发
2.6	1 300	100
2.8	1 000	80
3.0	850	30
3.2	700	10

1995年Etlicher报道了电脉冲触发沿面闪络开关^[17,18],开关操作电压为25~50 kV,峰值电流为700 kA,开关电感为4.5 nH,开关抖动小于2 ns,并对触发电压对开关特性的影响进行了研究。触发电压对通道数和开关电感的影响见图2,由图2可知,随着触发电压的升高,开关电感逐渐降低,放电通道数逐渐增加。

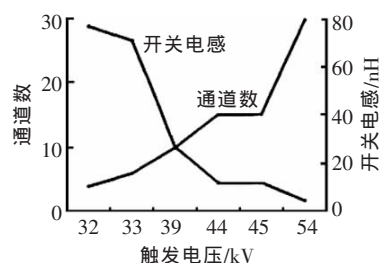


图2 触发电压对通道数和开关电感的影响(开关两端电压为25 kV)

2002年Carleton对沿面闪络开关的绝缘材料(Al_2O_3 , TiO_2 和改进的 BaTiO_3)进行了研究^[19],在电脉冲触发下,开关的时延都在20 ns左右,开关抖动在10 ns以内,在丝网印刷电极下 Al_2O_3 的寿命大于200次,其它两种材料的寿命均小于3次。

1995年Sampayan报道了微秒脉冲下的激光触发沿面闪络开关^[6],开关最高电压为200 kV,电压波形的半高宽为1.3 μs,采用Nd:YAG激光器进行激光触发,开关时延为几十纳秒,开关抖动为几纳秒。2003年Nunnally研究了UV激光触发、单通道及低电感的真空沿面闪络开关^[7],开关时延和开关抖动对激光触发脉冲能量密度的关系分别见图3、4。试验中所用激光波长为355 nm,半高宽(FWHM)近5 ns,能量为1~5 mJ;开关的绝缘介质为聚碳酸酯。由图3、4可知,随着开关两端电压的升高,开关时延降低;

90°沿面开关的时延小于45°沿面开关的时延;随着激光能量密度的增加,开关时延和抖动都有下降的趋势。

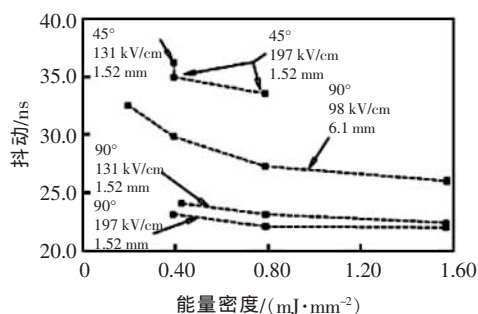


图3 激光脉冲能量密度对开关时延的影响

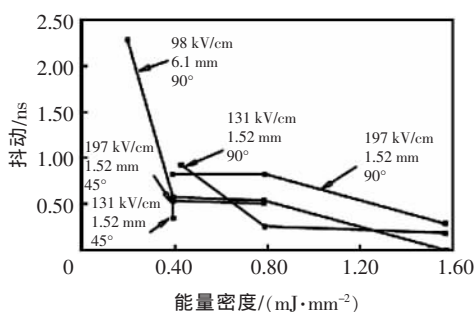


图4 激光脉冲能量密度对开关抖动的影响

4 沿面闪络开关绝缘介质

绝缘介质寿命及闪络特性研究在沿面闪络开关研究中比较关键,主要有以下成果。1986年Ranon^[20]在研究中发现沿面闪络对绝缘材料的破坏模式主要有两种:①放电后介质的表面材料分解为导电物质(碳化);②放电使电极材料溅射到绝缘体表面(金属化)。不同的绝缘材料倾向于不同的破坏模式,一般情况下陶瓷材料倾向于金属化破坏,高聚物材料更容易碳化。1991年Enge^[21]研究发现介质的热性能影响其在闪络中的寿命,介质的密度越大、比热越大、熔点越高及热导率越高其在闪络中的寿命越长。1985年Gray^[22]在研究中发现陶瓷材料在真空中闪络场强不如高聚物材料,陶瓷材料一般比高聚物材料的寿命要长;真空中沿面放电电弧一般在介质表面以上,电弧与介质表面并不紧密接触。1989年Hatfield^[23]研究发现利用磁场可以改变绝缘介质的闪络电压, $E \times B$ 的方向偏离绝缘介质表面时的闪络电压高于 $E \times B$ 的方向偏向介质表面时的闪络电压。

5 沿面闪络开关电极材料

沿面闪络开关所用的电极材料主要有铜、钼、不锈钢等金属材料,在通过大电流的情况下烧损较严重^[24, 25]。近几年来,在伪火花开关中应用了SiC电极^[26-28],用于消除大电流下的电弧现象。SiC电极是

一种半导体材料电极,具有抑制电极烧损的优点,其原理是SiC具有负的温度系数(与金属材料相反),其电阻率随温度的升高而降低,在室温时的电阻率为 $5 \Omega \cdot \text{cm}$,而在1400 K时的电阻率为 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$,如果SiC电极表面某一点的温度高于周围温度,则该点的表面电阻比周围表面电阻低,其功率损耗降低,温度下降,从而维持了电极表面温度相等,均匀的温度和电流密度抑制了电弧的产生和电极的烧损。SiC电极是一种新型材料电极,具有长的使用寿命。目前, SiC电极主要用于伪火花开关中,将它应用于闪络开关中可能也会有良好的效果。

6 激光触发沿面闪络开关机理

激光触发沿面闪络开关是近年来出现的新型沿面闪络开关,具有较小的开关时延和开关抖动,有很好的发展前景。

6.1 激光对物质的作用

激光对物质的作用^[29, 30]是从入射激光被物质反射和吸收开始的,真空环境中入射激光的总能量是反射、吸收和折射3部分能量之和。材料对激光的反射和吸收数据与其入射表面状况、温度、试品纯度及环境等状况有关,主要依靠实验测量。激光与电介质的相互作用涉及束缚电子的极化,单光子或多光子吸收引起的电子从价带到导带的跃迁(光致电离),以及多种机制的非线性光学效应。固体材料中被吸收的激光能量直接转化为自由电子或束缚电子平均动能的增加,其中大部分再通过电子与晶格或离子的相互作用转化为材料表面层的热能,还存在热电子发射、光电效应和热离子发射的转化机制。

6.2 激光触发沿面闪络开关机理

2003年Nunnally^[7]提出了激光触发真空沿面闪络开关机理:绝缘介质表面吸收激光能量,使介质表面温度上升,从而使介质表面的吸附气体解吸附。一般情况下,介质表面解吸附气体密度太大不能使介质表面通过电子碰撞来击穿气体,随后解吸附气体向真空中扩散,一直到适合气体击穿或产生的气压与电极间隙距离符合巴申击穿条件为止,开关闪络闭合。开关的几何结构与开关电极间隙都不变,扩散气体区域的气体压力和电极之间的电场决定了开关特性。激光触发沿面闪络开关的闪络击穿过程可分为两种情况,分别见图5、6。

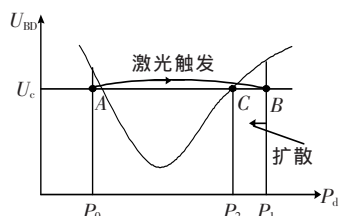


图5 击穿发生在巴申曲线右侧的过程

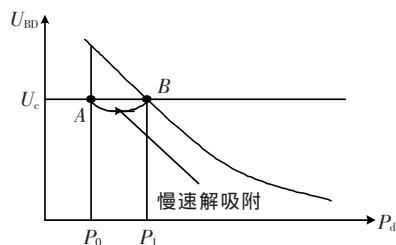


图6 击穿发生在巴申曲线左侧的过程

图5为击穿发生在巴申曲线右侧的过程。假设气体击穿电压为 U_{bd} ,电极间隙为 d ,气体压力为 P_0 。开关的初始状态位于低于真空击穿电压的A点处,开关的电压为 U_c ,气体压力为 P_0 。介质表面吸收激光脉冲后吸附气体快速解吸附,介质表面气体压力迅速增加到 P_1 ,使开关状态位于电压低于巴申击穿曲线的B点处。解吸附气体向真空中扩散,气体压力降低到 P_2 ,开关状态位于C点处,发生气体击穿,开关闭合。

图6为击穿发生在巴申曲线左侧的过程。此种情况是介质表面经过许多次激光脉冲的吸收后所剩吸附气体已经很少,介质未再吸附周围气体或邻近扩散气体前引起的放电。假定介质经过许多次激光脉冲——放电后,介质表面缺乏大量的吸附气体;介质表面吸收激光脉冲后,吸附气体解吸附的速率很低,逐渐增加介质表面的气体压力,当气体压力到达 P_1 时,发生低气压气体击穿,开关闭合。

7 结语

目前沿面闪络开关的触发方式大多采用电脉冲触发,激光触发沿面闪络开关的研究刚开始,直流高压下的沿面闪络开关研究较多,脉冲高压下的沿面闪络开关研究较少。沿面闪络开关有不少优点,沿面闪络开关主要有电脉冲触发沿面闪络开关和激光脉冲触发沿面闪络开关两种形式,激光触发沿面闪络开关的时延和抖动小于电脉冲触发沿面闪络开关。对于窄脉冲电压下的激光沿面闪络开关,激光脉冲与电压脉冲的同步是一个很关键的问题,有待于深入研究。激光触发沿面闪络开关的时延和抖动比较小,有望应用于并联的脉冲功率装置中解决并联同步问题。快速低抖动闭合开关是实现新型加速器概念——介质壁加速器^[31, 32]关键部件的方案之一,它有望推动介质壁加速器的发展。

参考文献:

- [1] MESYATS G A. Pulsed Power[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.
- [2] BLUHM H. Pulsed Power Systems: Principles and Applications [M]. Berlin: Springer Publishers, 2006.
- [3] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] SCHAEFER G, KRISTIANSEN M, GUENTHER A. Gas Dis-

charge Closing Switch[M]. New York: Plenum Press, 1990.

- [5] KELLOGG J C, BOILER J R, COMMISSO R J, et al. Triggered Vacuum Flashover Switch for High-power Applications[J]. Rev. Sci. Instrum., 1991, 62(11): 2 689-2 694.
- [6] SAMPAYAN S, CAPORASO G, CARDER B, et al. Optically Induced Surface Flashover Switching for the Dielectric Wall Accelerator[C]//Proceedings of Particle Accelerator Conference, 1995: 2 123-2 125.
- [7] NUNNALLY W C, NEURATH R, HOLMES C, et al. Investigation of UV Laser Triggered, Nanosecond, Surface Flashover Switches [C]//Proceedings of IEEE 14th Pulsed Power Conference, 2003: 1 355-1 358.
- [8] BERGMANN H M. Triggered Multichannel Surface Spark Gaps [J]. J. Phys. E: Sci. Instrum., 1982(15): 243-247.
- [9] SARJEANT W J, ALCOCK A J, LEOPOLD K E. Parametric Study of a Constant E/N Pumped High-power KrF* Laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1978, 14(3): 177-184.
- [10] BERGMANN H M, HASSON V. Low-impedance High-voltage Pulsers for Travelling-wave Excitation of High-power UV Gas Lasers[J]. J. Phys. E: Sci. Instrum., 1976(9): 982-984.
- [11] HASSON V, BERGMANN H M. High Pressure Glow Discharges for Nanosecond Excitation of Gas Lasers and Low Inductance Switching Applications[J]. J. Phys. E: Sci. Instrum., 1976(9): 73-76.
- [12] ZARASLOV D Y, KARLOV N V, KUZMIN G P, et al. Use of a Surface Discharge for Preionization of Gases in Discharge Lasers[J]. Sov. J. Quantum Electron, 1978(8): 1 048-1 051.
- [13] FEARN D G, WOODING E R A. Low Inductance Spark Gap [J]. J. Sci. Instrum., 1967(44): 571-572.
- [14] CURRY R D, KRISTIANSON M, AGARWAL V K, et al. Charging of Insulators in a Surface Discharge Switch[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1986, 21(2): 145-150.
- [15] PAI S T, MARTON J P. Effect of Trigger Electrode on the Channel Behavior of Surface Discharge Switch[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1985, 20(1): 93-103.
- [16] EARLEY L M, SCOTT G L. Low-cost 3 kV Triggered, Stripline Surface-discharge Switch [C]//Proceedings of IEEE 8th Pulsed Power Conference, 1991: 340-342.
- [17] ETLICHER B, FRESCALINE L, LAMAIN H, et al. Low Inductance Triggered Multichannel Surface Switch for Inductive Energy Storage Generator[C]//Proceedings of IEEE 10th Pulsed Power Conference, 1995: 243-248.
- [18] FRESCALINE L, LAMAIN H, AUVRAY P, et al. A Very Low Inductance Triggered Multichannel Surface Switch[C]//Proceedings of the Forty-first IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 1995: 350-354.
- [19] CARLETON E J, HUEBNER W. Surface Switching Characteristics of Variable Permittivity Dielectrics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2): 253-262.
- [20] RANON P M, KRISTIANSEN M, LEHR F M, et al. Insulator Damage in High Current Discharges [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1986, 22(6): 1 695-1 698.
- [21] ENGEL T G, KRISTIANSEN M, HAIR E O, et al. Estimating the Erosion and Degradation Performance of Ceramic and Polymeric Insulator Materials in High Current Arc Environments[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 533-537.
- [22] GRAY E W. Vacuum Surface Flashover: A High-pressure Phenomenon[J]. J. Appl. Phys., 1985, 58(1): 132-141.

(下转第 128 页)

平按 35 kV 等级设计,其 1 min 短时工频耐压 85 kV,雷电冲击试验电压 200 kV(BIL)。由以上分析可知,中性点最大雷电过电压已达 368 kV,在中性点绝缘水平不变的情况下需加装避雷器保护。

避雷器选择有如下原则:MOA 标称电流下的残压 U_r 需小于 BIL/K ,BIL 表示中性点基本雷电冲击水平,对 BIL 雷电配合系数 K 取 1.4;BSL 表示中性点基本操作冲击水平,对 BSL 操作配合系数 K 取 1.15; U_r 表示所选避雷器在标称电流下的残压^[6]。

所选避雷器需符合如下标准: $U_{r,ls} \leq BIL/1.4 = 200/1.4 = 142.86$ kV; 变压器中性点 $BSL = 0.83BIL = 166$ kV, $U_{r,ss} \leq BSL/1.15 = 166/1.15 = 144.34$ kV; 考虑变压器中性点加 5 Ω 小电抗时的最高工频过电压稳态值为 33.1 kV,暂态值为 41 kV; 避雷器的参数选择。避雷器额定电压应高于其在安装处可能出现的工频暂态电压。根据计算可选择额定电压为 51 kV、标称放电电流为 5 kA 等级的避雷器,为在 5 kA 标称放电电流下,其雷电冲击电流残压为 134 kV,操作冲击电流残压为 114 kV。其符合中性点绝缘水平的要求。变压器中性点受雷电侵入最大时加避雷器前后电压见表 6。中性点避雷器在最大 368 kV 的过电压水平下流过的最大电流为 1.14 kA,见图 5,且持续时间极短,比能量为 0.049 kJ/kV,避雷器耐受能力足够。

表 6 变压器中性点受雷电侵入最大时
加避雷器前后电压 kV

侵入波方式	中性点加避雷器前过电压	中性点加避雷器后过电压
500 kV 侧入侵	190	95
220 kV 侧入侵	368	99

6 结论

(1)为解决肥西变 500 kV 电网中单相接地短路

(上接第 114 页)

- [23] HATFIELD L L,BOERWINKLE E R,LEIKER G R,et al. Methods of Increasing the Surface Flashover Potential in Vacuum [J].IEEE Transactions on Electrical Insulation,1989,24(6):985-990.
- [24] ENGEL T G,DICKENS J C,KRISTIANSEN M.Insulator and Electrode Mass Erosion and Surface Voltage Holdoff Recovery for Transient, High Current Surface Discharges [J].IEEE Transactions on Magnetics,1993,29(1):1 143-1 147.
- [25] PARKER J V.Why Plasma Armature Railguns Don't Work (and What Can be Done about It)[J].IEEE Transactions on Magnetics,1989,25(1):418-424.
- [26] 谢建民,邱毓昌,姜唯,等.半导体碳化硅在伪火花开关中的应用[J].高电压技术,2002,28(8):26-28.
- [27] GORTLER A,FRANK K,INSAM S,et al.The Plasma in

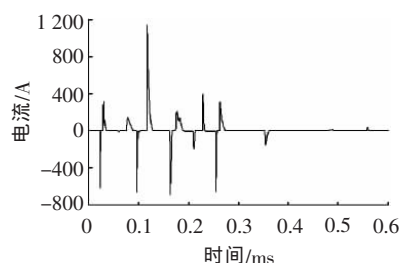


图 5 中性点避雷器电流波形

电流超过开关额定遮断电流的问题提供了合适的方式和理论依据,对解决 500 kV 电网中单相接地短路电流超标问题具有重要的意义。

(2)肥西变 500 kV 自耦变压器的中性点经 5 Ω 小电抗接地,中性点最大雷电过电压已达 368 kV,在中性点绝缘水平不变的情况下需加装避雷器保护。

(3)雷电侵入时,由于线路避雷器和母线避雷器对过电压的限制,到达主变已减弱,安装氧化锌避雷器可保护变压器中性点绝缘,且雷电从 220 kV 侧线路侵入要比 500 kV 侧线路侵入对主变中性点更具威胁。

(4)肥西变 500 kV 自耦变压器的中性点经 5 Ω 小电抗接地,加上额定电压 51 kV 氧化锌避雷器的保护,其绝缘水平仍可以维持原 35 kV 等级。

参考文献:

- [1] 周泽存,沈其工,方瑜,等.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,1988.
- [2] 舒廉甫.500 kV 变压器中性点接地方式成果应用推广[J].高电压技术,1993,19(4):45-48.
- [3] 沈扬,丁健.500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地系统的过电压与绝缘配合[J].电气应用,2005,24(5):24-27.
- [4] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [5] 平绍勋.电力系统内部过电压保护[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [6] 王天君.500 kV 自耦变压器中性点小电抗接地的过电压研究[J].华北电力技术,2000(9):1-3.

High-current Pseudospark Switches [J].IEEE Transactions on Plasma Science,1996,24(1):51-52.

- [28] URBAN J,ARSOV V,BICKES C,et al.Spectroscopic Investigations in the Dense Discharge Plasma of Pseudospark Switches [C]//Conference Record of the 1998 Twenty-third International Power Modulator Symposium,1998:217-220.
- [29] 孙承纬.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002
- [30] 陆建,倪晓武,贺安之.激光与材料相互作用物理学[M].北京:机械工业出版社,1991
- [31] 严萍,王珏,张适昌.新型介质壁加速器[J].电工电能新技术,2005,24(4):43-46.
- [32] CAPORASO G J.Progress in Induction Linacs[C]//International Linac Conference,1999:658-662.