

# 特高压输电线路潜供电弧的物理模拟与建模综述

孙秋芹<sup>1</sup>, 李庆民<sup>1</sup>, 吕鑫昌<sup>1</sup>, 王冠<sup>1</sup>, 李庆余<sup>2</sup>

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东省 济南市 250061;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Survey on Physical Simulation and Mathematical Modelling for Secondary Arcs of UHV Transmission Lines

SUN Qiuqin<sup>1</sup>, LI Qingmin<sup>1</sup>, LÜ Xinchang<sup>1</sup>, WANG Guan<sup>1</sup>, LI Qingyu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** In spite of elucidating the general design of the test circuit, the layout of the arc ignition equipment, the choice of the value and duration for the short currents, the wind velocity and its direction were all summarized to the question of equivalence of simulating test for secondary arcs, including the obstacles and the deficiency of it. The setup and the procedure of the field test for secondary arcs were introduced, especially for that of ultra high voltage transmission lines home and abroad. The empirical formula for the secondary arc duration nowadays were put forward. While describing and comparing the advantages and deficiencies of the existing black-box model and the physical models, the research status for modeling the secondary arcs were introduced. The key issues encountered while revealing the inherent mechanism and modeling of the secondary arcs were elaborated. On this basis, the characteristics of the secondary arcs under different conditions of novel transmission lines were analyzed. Referential suggestions for the secondary arc test and modeling were also presented.

**KEY WORDS:** ultra high voltage (UHV) transmission line; secondary arc; equivalence; physical simulation; mathematical modeling; AC and DC transmission lines installed on the same tower; half-wave length

**摘要:** 基于潜供电弧模拟试验的等价性, 阐述了试验回路设计、引弧材料选取、短路电流值及其持续时间选择、风速风向模拟与调节等技术, 总结了现有模拟试验中遇到的难题与不足之处, 介绍了潜供电弧的现场试验的步骤与过程, 特别是国内外特高压等级输电线路潜供电弧的试验成果, 给出了现有潜供电弧熄灭时间的有关经验公式。分析了潜供电弧数

学建模的研究现状, 从简化的黑盒模型以及基于能量守恒的等离子体模型出发, 比较分析了各种模型的优势与缺陷, 指出了潜供电弧内在作用机制和等效模型研究中存在的关键难题。在上述基础上, 结合新型输电方式的发展, 分析了不同工况下潜供电弧的新特点, 给出了潜供电弧试验与建模的参考性建议。

**关键词:** 特高压输电线路; 潜供电弧; 等价性; 物理模拟; 数学建模; 交直流同塔混架; 半波长

## 0 引言

近几十年来, 针对常规输电线路潜供电弧的产生机制、影响因素、熄灭和重燃机制等, 国内外学者采用物理实验、数学建模和仿真等手段开展了大量研究工作, 多集中于超高压电网<sup>[1-2]</sup>。

潜供电弧的动态物理过程与很多因素密切相关, 集中体现为2大类, 即确定性因素与非确定性因素: 确定性因素主要包括线路长度、电压等级、并联电抗器位置及其补偿度(或快速接地开关)、杆塔结构等; 非确定性因素主要包括故障位置、短路电弧电流大小及其持续时间、风速大小与方向、弧道恢复电压等<sup>[3]</sup>。其中, 线路长度、电压等级等因素通过影响潜供电流值、恢复电压及其上升率的大小从电气上间接影响潜供电弧的物理特性; 而风速、风向、短路电弧等因素通过作用于弧道而直接影响潜供电弧的发展与重燃特征。

通过物理实验模拟、理论分析与动态仿真建模, 研究特高压半波长输电线路潜供电弧的发生与发展机制, 结合潜供电弧伏安特性的强非线性与随机性特征, 提出有效的潜供电弧熄灭技术与抑制方法, 是对超/特高压输电线路潜供电弧研究的重要发

基金项目: 国家电网公司科学技术项目(5250909)。

Project Supported by Science and Technology Research Foundation of State Grid Corporation of China (5250909).

展,对于完善单相自适应重合闸技术,提高超/特高压输电线路的稳定与可靠性,具有突出的理论意义和应用价值。

## 1 潜供电弧的模拟试验

输电线路潜供电弧的现场试验存在很多的局限性,集中体现在试验方案、试验次数以及试验条件的限制,同时对于更高电压等级或新型输电方式的线路,当线路还没有建成,现场试验就无法进行。模拟试验是研究潜供电弧特性的重要途径<sup>[2]</sup>。

潜供电弧模拟试验的关键主要体现在试验的等价性以及试验的灵活性,即结果可靠且试验条件灵活可变。现有潜供电弧模拟试验的关键问题为:潜供电弧模拟试验回路的设计、引弧装置的布置方式以及引弧材料的选择、短路电流值的选取、风的模拟以及其他一些相关的试验条件<sup>[2]</sup>。

现有潜供电弧模拟试验回路主要有串联试验回路和并联试验回路,两者的主要区别是潜供电弧熄灭后,恢复电压的频率特性表现不一样,其结构如图1所示。

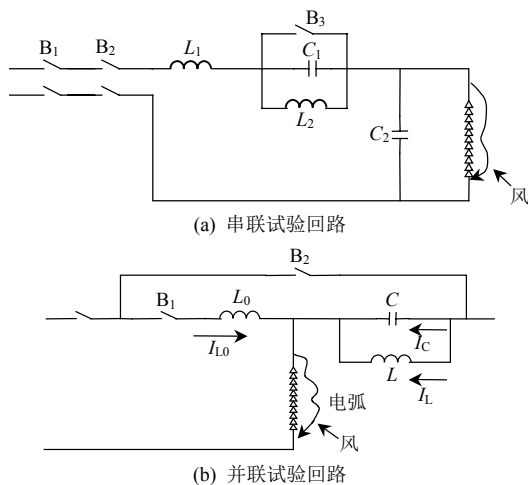


图1 潜供电弧模拟试验回路  
Fig. 1 Test circuit for secondary arc

图1(a)中:  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  分别为保护、合闸、投入  $C_1$  所用的快速断路器;  $L_1$  为模拟系统的等值电感,试验中用以提供电感性的短路电流;  $C_1$  为集中电容,用以模拟潜供电弧的电容回路;  $L_2$  用于模拟补偿小电抗的作用,如果线路上没有并联电抗,即  $\omega L$  趋近于无穷大,上述回路中将只有电容  $C$  的支路,取消  $L$  形成的支路即可;  $C_2$  为等值的线对地电容之半,使在弧道上形成必要的恢复电压。中国电力科学研究院、陕西中试所等单位针对西北新建 330 kV 线路,采用该电路结构,做了大量的潜供电弧试验研究<sup>[2]</sup>。

图1(b)中开关操作顺序为:  $B_2$  打开,合上  $B_1$ ,

引燃电弧,经过一段时间,  $B_2$  合上,打开  $B_1$ 。要求控制  $B_1$ 、 $B_2$  的动作时差尽可能小,以免影响试验条件。并联回路较之串联回路,  $C$  上无过电压,电弧过零后的稳态恢复电压合乎要求,同时参数计算简化。我国的超高压、特高压单回、特高压双回输电线路的潜供电弧的模拟试验中即采用该回路结构<sup>[4-5]</sup>。

模拟试验中常采用引弧导线将瓷瓶串短接,导体在大电流作用下气化形成电弧通道以模拟甚高电压的雷击闪络。现有潜供电弧中的引弧材料主要包括:保险丝、铜丝、铁线、钢琴丝、镍铬电阻丝等<sup>[2,6-12]</sup>。不同的引弧材料使得电弧的熄灭时间有一定差异;国外相关的试验中多采用铜丝进行相关试验<sup>[6-9]</sup>;有关学者认为,引弧材料形成的游离物质与数以千计的短路电流形成的游离物质相较处于次要地位,可以忽略<sup>[2]</sup>。

图2为巴西某超高压线路试验线路上,潜供电弧的引弧装置布置<sup>[6]</sup>。绝缘子串两端安装了一套挂钩,铜线安装在绝缘子串两端的挂钩上引燃短路电流。

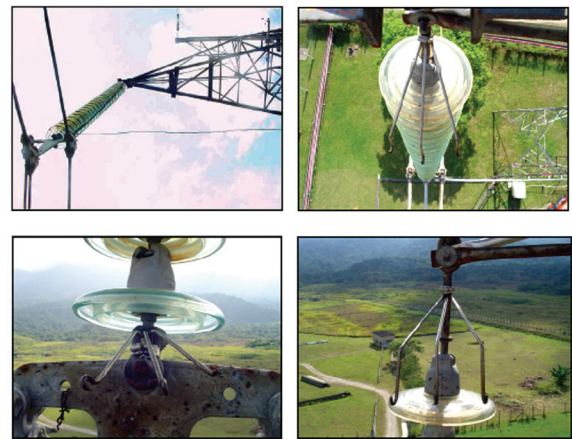


图2 电弧模拟试验铜线布置  
Fig. 2 Layout of arc ignition equipment

潜供电弧出现在短路故障电流被切除后,短路电弧的燃烧时间为 0.1s 级,其值从几 kA 到十几 kA 不等。国内外进行了大量的短路电流值对潜供电弧影响的模拟实验,结论至今未统一。大多数试验结果表明引弧电流较小时,短路电流值的大小对潜供电弧自灭时间影响不大,而当引弧电流增大到一定程度后,弧道受到的电动力和热上升力大为增加,弧柱在大气中的游动加剧,更为弯曲,更有利于熄灭。相关机制尚有待进一步的研究。

对流散热是潜供电弧自灭的主要因素之一,风速和风向对自灭速度影响较大。中国电科院进行的现有潜供电弧试验中主要采用较为简单的人工风,通过调节人工风筒来模拟风。通过改变整流器和风

栅, 变更风机的位置获得所需的风速与风向<sup>[2]</sup>。风向与电动力方向相反时, 弧道在 2 个力作用下, 不能延长, 自灭较为缓慢, 灭弧时间的分散性增大; 风向与弧道电动力发展方向相同时, 自灭速度很快, 灭弧时间短, 同时分散性小。试验中, 弧长不断变化拉长, 风扇形成的风速难以达到均匀, 这导致试验数据的分散性较大。尽管如此, 风对潜供电弧的影响作用亦不能夸大, 由于实际中常出现电弧短时熄灭的情况, 而此时风对电弧的运动影响很小, 电弧长度还远来不及拉伸即已自灭。

研究潜供电弧的介质恢复特性对于深入理解潜供电弧的熄灭与重燃机制具有重要的意义。日本建立了潜供电弧的介质恢复特性试验平台, 通过脉冲电弧回路产生脉冲电压波形, 在电流过零后延迟触发, 通过大量的延续试验改变试验的延时间隔, 以确定弧道的去游离过程随时间的上升特性, 获得潜供电弧的介质恢复过程<sup>[8]</sup>。已有试验结果表明潜供电弧的介质恢复过程与绝缘子串的结构和类型、电弧电流的直流分量、短路电弧的持续时间等密切相关。

现有潜供电弧的模拟试验的基本假定条件为忽略 2 个端部的电极效应, 在其余的全长弧道内, 认为每段弧道特性彼此一样。从而在电流值、恢复电压梯度值相同的情况下, 取其部分长度进行模拟研究。现有的大量文献表明长弧和短弧具有明显不同的物理特征, 如何确定模拟试验中短电弧的临界长度, 使其能充分反映长间隙电弧的物理特性, 现有试验中虽有定性的描述, 但至今仍缺乏定量的分析与验证, 这是模拟试验等价性的关键, 亦是最大的难点。

此外, 现有潜供电弧的模拟试验多采用集中参数进行电路等效设计, 以静电感应为基础, 忽略电磁感应分量的影响。以单位长度电弧上恢复电压值相等来等效模拟电弧的熄灭特性, 无法反映电弧熄灭时刻线路恢复电压上升率的影响, 有一定的局限性。同时以工频分量为基础, 较少分析在串补线路等复杂工况下, 带低频分量及电流过零次数减少时的潜供电弧熄灭特性, 现有潜供电弧试验结果的适用范围还有待商榷。

## 2 潜供电弧的现场试验

国内外针对输电线路潜供电弧进行了大量的现场试验, 并总结了许多的现场数据。随着输电线路电压等级的提高, 超/特高压输电线路的建设, 相关的现场试验研究也在进行, 具有典型意义的现场试验如下所述。

巴西 CEPEL 高电压实验室, 在户外的 500 kV 线路试验段进行了潜供电弧的人工接地试验(燃烧轨迹如图 3<sup>[6]</sup>所示)。试验线路共包括 3 个杆塔结构, 分为 2 段, 电弧产生并实施监测。在这次测试中, 电弧电流通 1 s, 频率为 60 Hz, 测量到的电弧电流等级分为: 60、100、150、200 A(有效值)<sup>[6]</sup>。该试验进一步验证了潜供电弧的非线性特征, 通过试验测量了潜供电弧的各次谐波含量, 并在实际高压线路上研究了长间隙电弧的运动轨迹与熄灭特性, 可作为比较和分析模拟试验的等价性与有效性。

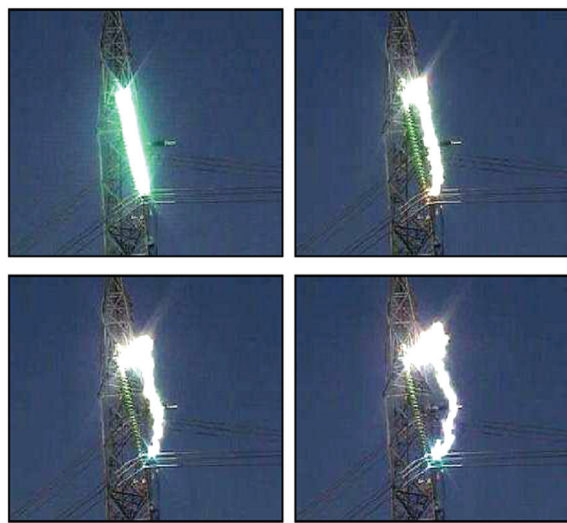
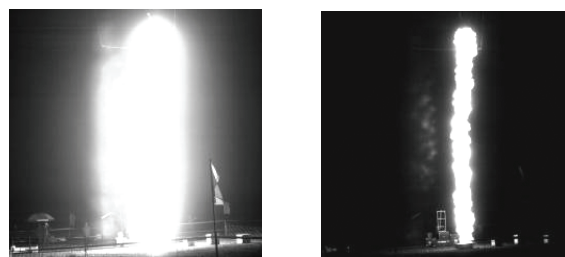


图 3 潜供电弧燃烧轨迹

Fig. 3 Captured images of secondary arc in field test

我国特高压交流试验示范工程长南线的南阳站侧进行了人工 C 相瞬时接地试验<sup>[13]</sup>。引弧线长度为 11 m, 故障后 40 ms 左右南阳站 1 000 kV 断路器分闸, 故障后约 75 ms 长治站保护跳开 1 000 kV 断路器, 直至 1 s 后两侧断路器单相重合成功, 拍摄的电弧图像如图 4<sup>[13]</sup>所示。试验时的风速约为 1.2 m/s, 北风, 实测的燃弧时间为 110 ms。该试验结果表明微风在短时间内对长达 11 m 的开放电弧的影响较小, 电弧呈现为直线形状。短路电弧的弧道粗、亮度大, 潜供电弧弧道细, 亮度小。

俄罗斯的 1 150 kV 特高压输电线路, 线路长度



(a) 短路电弧

(b) 潜供电弧

图 4 拍摄的电弧图像

Fig. 4 Arc films in field test

500 km, 线路首端安装并联电抗器  $3 \times 300$  Mvar, 线路末端安装并联电抗器  $2 \times (3 \times 300)$  Mvar。潜供电弧试验过程中, 在线路的末端 C 相的最后一基杆塔上的绝缘子串两端串接一直径为 0.5 mm 的铜线<sup>[10]</sup>。线路末端断路器始终断开, 当线路首端断路器合闸时, 绝缘子串两端的铜线迅速燃烧引燃短路电流, 即模拟产生短路电弧。此时保护识别线路故障, 信号发送到首端, 打开故障相断路器。其他两相依旧运行, 潜供电弧在短路电弧通过的弧道上产生。纪录并获取了相关电压、电流数据。实测的熄弧时间在 0.30 s 附近。

以上试验中, 潜供电弧多在较短时间内熄灭, 其原因主要是: 1) 由于条件限制, 仅能在线路的两端进行引弧, 而分析表明, 线路越靠近中段时, 其潜供电流值较大, 电弧往往越难以熄灭, 这使得上述试验不能反映最严重工况; 2) 由于电弧燃烧的随机性与电弧试验次数的限制其熄灭时间有一定随机性。尽管如此, 上述现场试验仍是模拟试验和数学建模的重要基础。

美国、日本、匈牙利、德国有关学者针对潜供电弧也做了大量的现场试验和测量工作, 在很大程度上丰富了潜供电弧的物理特性研究<sup>[9, 11-12]</sup>。

国内外学者和科研机构通过进行相关的模拟和现场试验, 总结相关的数据, 对潜供电弧的燃弧时间给出了简化的函数关系式, 以适应工程需要。

美国针对 500 kV 线路模拟试验, 给出了潜供电弧的持续时间与其主要因素(潜供电流)之间的数值关系<sup>[11]</sup>。

前苏联针对超高压输电线路的潜供电弧问题, 先后提出了停电间隔时间  $\Delta t$  的 2 种表达式:  $\Delta t = 0.25(0.1I + 1)$ ;  $\Delta t = t_r + 0.2$ , 其中  $I$  为潜供电流的强制分量,  $t_r$  为潜供电流和恢复电压的对应函数<sup>[14]</sup>。

我国华北电科院和中国电科院合作研究超高压输电线路的潜供电弧物理特性, 进行了相关的试验, 对试验数据进行回归曲线拟合, 给出了不同电位梯度下对应的电弧熄灭时间  $t_{90\%}$  的对应公式<sup>[15]</sup>。

如式(1)和(2)所示:

$$t_{90\%} = 3.3333 \times 10^{-4} I^2 + 6.6968 \times 10^{-3} I + 6.5105 \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$t_{90\%} = 2.5943 \times 10^{-4} I^2 + 5.3623 \times 10^{-3} I + 4.6989 \times 10^{-2} \quad (2)$$

式(1)对应起弧电位梯度  $E = 13.5$  kV/m; 式(2)对应起弧电位梯度  $E = 8.1$  kV/m。

上述试验大多基于特定的试验线路和环境, 对

相关的数据进行拟合, 反映了潜供电弧的熄灭时间与其部分重要影响因素之间的非线性关系, 具有一定的工程参考价值, 但不能推广至普通的输电线路, 更不能反映潜供电弧内在的物理机制。

### 3 潜供电弧的数学建模

数学建模与仿真已成为研究潜供电弧的重要工具。电弧是一个复杂的动态物理与化学过程。在电弧模型的研究初期, Cassie 和 Mayr<sup>[16]</sup>提出了获得普遍认可的经典黑盒模型。此后, 许多学者对黑盒模型进行了演绎和推导, 进而提出适于长间隙电弧放电的数学模型: V. V. Terzija 等<sup>[17]</sup>针对处于静止和自由空气中的长电弧进行了实验和建模, 将不规则的电弧电压简化成一个随电流方向变化的方波, 以测量数据进行最小二乘处理, 确定相关参数值; M. Farzaneh 等人<sup>[18]</sup>则对交直流绝缘子串覆冰表面的电弧特性进行了详细研究。

当前, 潜供电弧的数学模型多以长间隙电弧放电的物理模型为基础进行改进, 通过对潜供电弧实验数据的拟合来确定模型中的物理参数<sup>[19-21]</sup>。

A. T. Johns 等<sup>[19-21]</sup>基于改进的 Mary 公式-电弧电导微分方程<sup>[16]</sup>, 建立了潜供电弧的 EMTP 仿真模型, 并被许多学者采用, 作为研究单相自适应重合闸的依据。人们在 A. T. John 模型的基础上进行了大量改进和完善工作, 针对公式中的各个变量(电弧时间常数  $\tau$ 、电弧电压梯度  $E$ 、静态电弧电压、电弧长度等)给出了不同的表达式, 并通过实验数据的曲线拟合来确定变量值。俄罗斯学者基于上述模型, 第 1 次给出了特高压等级输电线路潜供电弧模型的相关数据<sup>[10]</sup>。

中国电科院通过将电弧链式分段化, 对潜供电弧进行受力分析, 数值计算电弧的运动轨迹, 并获得电弧长度的变化, 将结果嵌入到电弧电导微分方程中, 进行潜供电弧的电磁暂态仿真<sup>[11]</sup>。尽管如此, 至今尚未有一个完善统一的电弧电导微分方程表达式。

M. V. Dmitriev 等<sup>[22]</sup>基于能量守恒原理, 将电弧假定为固定半径的圆柱体结构, 并忽略能量的辐射和对流, 建立了潜供电弧的磁流体物理模型, 对潜供电弧进行了仿真计算; 但该模型没有考虑风的作用, 将电弧的长度固定化, 其应用范围受到限制, 同时与实际情况有较大差距。

现有潜供电弧物理模型的参量中, 学界普遍认为电弧的熄灭与电弧长度密切相关, 是关注的一个重点。因电弧在游动过程中不断延伸, 形成扭曲或成为环状, 且绝大多数情况下, 弧道在延伸出来的各个环



状弯曲处不断被自身短接,其长度本身的测量就是一个难题。此外,电弧长度的变化与环境条件(风速、风向等)以及电弧热平衡状态密切相关,表现出很大的随机性,有关文献中给出了潜供电弧长度随时间变化的近似表达式<sup>[19,23]</sup>,但至今尚未有定论。

在潜供电弧的内在作用机制和等效模型上也存在较大的争议性,特别是电弧的熄灭机制。现有的潜供电弧熄灭判据主要包括介质恢复理论与能量平衡理论:前者认为电弧重燃是因外加电场将间隙击穿的结果,即电击穿;后者认为电弧重燃是由于零休阶段弧隙的输入能量大于弧隙的散出能量,即热击穿。2种理论在现有潜供电弧研究文献中广泛应用。前者在电流过零时,通过比较恢复电压与介质恢复强度来判断熄灭后的重燃现象;后者则计算零休阶段单位长度的电弧瞬时电阻对时间的导数,当其超过某一设定阈值时,即判断电弧熄灭,反之重燃。很多学者还基于实验研究给出了潜供电弧熄灭的简化判据公式,如基于电弧长度的熄灭判据<sup>[24]</sup>,前苏联学者给出的潜供电弧熄灭时间与潜供电流稳态值的函数关系式<sup>[10,14,23]</sup>。上述简化判据公式的适用范围仍十分有限,而且有些条件下与实际工况明显不符。以基于电弧长度的熄灭判据为例,试验中常出现电弧来不及拉长而短时熄灭的情况,这与该判据完全矛盾。电弧熄灭重燃判据的数学建模是电弧建模的关键。

因潜供电弧具有强烈的随机性与不稳定性,如何从大量的数据中提取有价值的信息以分析潜供电弧的影响因素,也是一个重要的问题。曾有学者将潜供电弧的熄灭时间编制成曲线,将电弧熄灭时间分割在最大值与最小值区域之间,将某一概率下的数值连线,取中间概率作为有效值进行分析<sup>[25]</sup>。区别于少量带随机性的电弧熄灭试验数据,该研究基于大量的测量,可应用于工程中作为判断电弧概率熄灭时间,不用考虑相关因素的内在影响,较为简单。

综上所述,潜供电弧会受到诸多不确定性因素的影响,相关的试验中表现出很大的随机性与不稳定性。而空间环境变量、电磁场、流场以及潜供电弧微观、宏观参量瞬时快速变化,这是深入分析潜供电弧的物理特性并建立相关模型的最大难点所在。

## 4 新型工况下潜供电弧的试验与建模

### 4.1 交直流同塔混架下潜供电弧特性研究

交直流同塔混架是解决输电线路走廊缺乏的

有效措施<sup>[26-27]</sup>,相关研究已纳入国家电网的科技发展议程。同塔混架下,当直流极线发生故障时,尽管通过直流阀的控制可将直流故障线路电流的值减小到零,但交流线路对临近直流输电线路的工频感应将在直流极线故障点处形成潜供电弧,影响到直流极线故障的消除时间<sup>[27]</sup>。深入分析直流短路电弧对潜供电弧的影响,并考虑直流输电极线两端的元器件的布置,针对直流输电线路的具体结构开展相关的模拟试验与数学建模研究,对于确定直流阀的重启动时间,提高直流输电线路的供电可靠性具有重要的意义。

### 4.2 特高压半波长输电线路潜供电弧特性研究

超长距离特高压半波长交流输电兼具技术与经济优势,在我国应用前景广阔<sup>[28-30]</sup>。特高压半波长输电线路的电压等级高,输电距离超长,传输功率大,其潜供电弧表现出许多独有的物理特征<sup>[30]</sup>: 1) 潜供电流和弧道恢复电压的数值很大,使得电弧熄灭困难; 2) 短路电流较大,其对潜供电弧的影响的物理机制尚待研究; 3) 潜供电流的电磁感应分量和静电感应分量与常规线路不同,其电流低频成分复杂; 4) 因线路结构的特殊性,传统的潜供电弧抑制方法已不再适用。半波长输电线路潜供电弧既具有一般线路潜供电弧的通性,也具有其特殊性。开展相关理论探索与技术创新研究,具有重要的理论意义与工程价值。

## 5 结论

1) 潜供电弧涉及到等离子体物理学、流体力学、传热学、电磁学等多学科交叉,属于前沿基础性研究领域。开展相关的试验研究和数学建模可揭示电弧的内在物理特性,是进一步建立电磁暂态仿真模型的基础,也是后续故障分析,提出抑制新方法,制定单相重合闸策略的关键所在。新型输电技术的发展,使得潜供电弧出现了新的特征,开展相应的试验与建模研究具有重要意义。

2) 试验回路的设计是潜供电弧模拟试验的关键,其重点在于试验回路的等价性。选择适当的电路结构和电压等级并反映输电线路潜供电弧燃烧时的稳态过程和熄灭重燃时的瞬态过程是设计的难点。现场试验对于确定输电线路潜供电弧的实际特性具有重要的佐证意义,也是模拟试验的参考依据。

3) 潜供电弧的黑盒模型简单常用,但无法深入反映电弧的内在物理本质,且不存在统一的可推广的参数表达式,其不能反映电弧阴阳极的特性对

弧柱的影响, 同时在弧柱的特性上做了很多的简化。基于磁流体动力学的潜供电弧的物理模型是潜供电弧数学建模的发展方向。深入理解潜供电弧起始、运动、发展、熄灭与重燃的动态演化规律, 纳入空间电磁场、空间流场与潜供电弧熄灭、重燃电磁暂态过程的耦合效应, 是数学建模的关键, 也是最大的难点。

## 参考文献

- [1] 曹荣江, 朱拱照, 崔景春. 关于超高压线路上潜供电弧持续现象的研究: 第一部分[J]. 高电压技术, 1975, 1(1): 72-77.  
Cao Rongjiang, Zhu Gongzhao, Cui Jingchun. Research of continuous arcing process of secondary arc on EHV transmission lines: part I [J]. High Voltage Engineering, 1975, 1(1): 72-77(in Chinese).
- [2] 曹荣江, 朱拱照, 崔景春. 关于超高压线路上潜供电弧持续现象的研究: 第二部分[J]. 高电压技术, 1976, 2(3): 14-59.  
Cao Rongjiang, Zhu Gongzhao, Cui Jingchun. Research of continuous arcing process of secondary arc on EHV transmission lines: part II[J]. High Voltage Engineering, 1976, 2(3): 14-59(in Chinese).
- [3] Danyek M, Danyek P. Improving the reliability of experimental data about secondary arc duration[C]//Proceeding of the 17th Hungarian-Korean Seminar, EHV Technology-II. Keszthely-Lake Balaton, Hungary: Budapest University of Technology and Economics, 2001: 32-40.
- [4] 曹荣江, 顾霓鸿, 盛勇. 电力系统潜供电弧自灭特性的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 73-78.  
Cao Rongjiang, Gu Nihong, Sheng Yong. Test study on self-extinction behavior of secondary arc on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 73-78(in Chinese).
- [5] 和彦淼, 宋泉, 曹荣江. 特高压同塔双回路输电线路潜供电弧模拟试验等价性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 4-7.  
He Yanmiao, Song Gao, Cao Rongjiang. The equivalence research for secondary arc simulation test of UHV with double circuit transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 4-7(in Chinese).
- [6] Montanari A A, Tavares M C, Portela C M. Secondary arc voltage and current harmonic content for field tests results[C]//IPST09. Kyoto, Japan: CRIEP, 2009: 150.
- [7] Montanari A A, Tavares M C, Portela C M. Adaptive single-phase autoreclosing based on secondary arc voltage harmonic signature [C]//IPST09. Kyoto, Japan: CRIEP, 2009: 149.
- [8] Goda Y, Matsuda S, Inaba T, et al. Insulation recovery characteristics after arc interruption on UHV transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1907-1913.
- [9] Goda Y, Matsuda S, Inaba T, et al. Forced extinction characteristics of secondary arc on UHV transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1322-1330.
- [10] Dudurych I M, Gallagher T J, Rosolowski E. Arc effect on single-phase reclosing time of a UHV power transmission line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 854-860.
- [11] Perry D E. Investigation and evaluation of single phase switching on EHV network in the United States[C]//CIGRE 1984 Session. Paris, France: CIGRE, 1984: 39-08.
- [12] Ban G, Prikler L, Banfai G. Testing EHV secondary arcs[C]//10<sup>th</sup>-13<sup>th</sup> IEEE Porto Power Conference. Porto, Portugal: IEEE, 2001: 6.
- [13] 陈维江, 颜湘莲, 贺子鸣, 等. 特高压交流输电线路单相接地潜供电弧仿真[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 1-6.  
Chen Weijiang, Yan Xianglian, He Ziming, et al. Simulation for secondary arc caused by single-phase grounding in UHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 1-6(in Chinese).
- [14] 陈维贤. 超高压电网稳态计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 102-103.
- [15] 刘亚芳, 袁亦超, 汪启槐, 等. 电力系统潜供电弧有补偿情况的试验研究[J]. 华北电力技术, 1995(8): 53-58.  
Liu Yafang, Yuan Yichao, Wang Qihuai, et al. Test of the secondary arc of transmission lines under shunt compensation[J]. North China Electrical Power, 1995(8): 53-58(in Chinese).
- [16] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 13-283.
- [17] Terzija V V, Koglin H J. On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1012-1017.
- [18] Farzaneh M, Zhang J, Aboutorabi S S. Dynamic modeling of DC discharge on ice surfaces[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 463-474.
- [19] Johns A T, Al-Rawi A M. Digital simulation of EHV systems under secondary arcing conditions associated with single-pole autoreclosure [J]. IEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribution, 1982, 129(2): 49-58.
- [20] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission system[J]. IEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 148-154.
- [21] Johns A T, Al-Rawi A M. Developments in the simulation of long distance single-pole-switched EHV systems[J]. IEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribution, 1984, 131(2): 67-77.
- [22] Dmitriev M V, Evdokunin G A, Gamliko A. EMTP simulation of the secondary arc extinction at overhead transmission lines under single phase automatic reclosing[C]//IEEE Conference on Power Technology. Russia: IEEE, 2005: 1-6.
- [23] Prikler L, Kizilcay M, Ban G, et al. Improved secondary arc models based on identification of arc parameters from staged fault test records [C]//14th PSCC. Sevilla: IEEE, 2002: 1-7.
- [24] 刘继. 送电线路自动重合闸装置[M]. 上海: 科技卫生出版社, 1958: 70-81.
- [25] Nava J H V, Rivas R A, Urdaneta A J. A probabilistic approach for secondary arc risk assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 657-662.
- [26] Larsen E V, Walling R A, Bridenbaugh C J. Parallel AC/DC transmission lines steady-state induction issues[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 667-674.
- [27] Woodford D. Secondary arc effects in AC/DC hybrid transmission [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(2): 704-711.
- [28] Hubert F J, Gent M R. Half-wavelength power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(10): 965-974.
- [29] Prabhakara F S, Parthasarathy K, Rao H N R. Analysis of natural half-wave-length power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(12): 1787-1794.
- [30] Liceto F, Cinieri E. Analysis of half-wave length transmission lines with simulation of corona losses[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 2081-2091.

收稿日期: 2010-10-20.

作者简介:

孙秋芹(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统过电压、电弧的试验与建模, E-mail: inter276@mai.sdu.edu.cn;

李庆民(1968), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压与绝缘技术, E-mail: lqmee@sdu.edu.cn.



孙秋芹

(责任编辑 马晓华)