

1 000 kV 特高压输电线路潜供电弧试验研究

和彦森¹, 宋杲¹, 曹荣江¹, 袁亦超², 林集明¹, 班连庚¹, 李炜¹,
杨堃¹, 韩彬¹

- (1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;
2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京市 西城区 100045)

Test Research of Secondary Arc in 1 000 kV UHV Double-circuit Transmission Lines

HE Yanmiao¹, SONG Gao¹, CAO Rongjiang¹, YUAN Yichao², LIN Jiming¹, BAN Liangeng¹, LI Wei¹,
YANG Kun¹, HAN Bin¹

- (1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
2. North China Electric Power Research Institute Co. Ltd, Xicheng District, Beijing 100045, China)

ABSTRACT: The auto-reclosing time and the success rate of the single-phase auto-reclosing operation are determined by the extinguishing time of the secondary arc. The extinction characteristic research of the secondary arc is the key technology to guarantee the success of the auto-reclosing operation. Laboratory simulation is an effective method to research the extinction characteristic of secondary arc in ultra high voltage (UHV) transmission lines. According to the secondary arc and the recovery voltage value of the UHV transmission lines, a total of 102 groups amounted to 2013 times of secondary arc simulation experiments with different wind speeds, voltage gradients and secondary arc currents were conducted under compensation-free, normal compensation and compensation conditions. Secondary arc extinction characteristics on UHV transmission lines were investigated, and the results provided a scientific basis for stipulating the design specification of circuit breakers' reclosing time.

KEY WORDS: AC ultra high voltage (UHV); secondary arc; recovery voltage; simulation test; extinction characteristic; single-phase auto-reclosing operating

摘要: 潜供电弧的自灭时间决定单相重合闸的重合时间和成功率, 潜供电弧自灭特性的研究是保证单相重合成功的关键技术。特高压输电线路潜供电弧试验室模拟试验是行之有效的研究方法, 根据特高压回路设计可能的潜供电流和恢复电压值, 采用试验室单相等价回路进行了相应风速、电压梯度、潜供电流值的无补偿、正常补偿和过补偿情况下的 102 组

(共计 2013 次)潜供电弧模拟试验, 深入研究了特高压输电线路潜供电弧自灭特性, 其结果为确定断路器单相重合闸时间整定值的设计规范提供了科学依据。

关键词: 交流特高压; 潜供电弧; 恢复电压; 模拟实验; 自灭特性; 单相重合闸

0 引言

建设特高压(ultra high voltage, UHV)电网是满足未来持续增长的电力需求的根本保证^[1]。2008 年国家电网公司建成晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程, 2010 年建成淮南—皖南—浙北—上海 1 000 kV 交流特高压同塔双回输电工程等。由于特高压线路的输送容量大, 导线间的静电感应和电磁耦合效应突出^[2-4], 因此如何使潜供电弧快速自灭, 将直接影响单相重合闸的无电流间歇时间和成功率^[1]。为保证特高压线路的安全运行和增强系统的稳定性, 潜供电弧自灭特性的研究是目前急需研究的关键问题。

世界上仅有日本、前西德和前苏联等少数几个国家曾做过潜供电弧自灭特性试验的研究^[5-6]。对于 1 000 kV 线路的潜供电弧自灭特性, 有些 500 kV 的研究结论可以推延到 1 000 kV, 但某些结论尚无法获得, 如前人试验研究的电压梯度最高为 16 kV/m, 已不能满足工程设计和运行要求。

不少专家学者用仿真等手段来计算潜供电弧自灭时间^[7-10], 但目前均未应用到实际工程中, 对于开放性的潜供电弧来说, 由于其自灭时间受自然

基金项目: 国家电网公司重大科研攻关项目(B11-07-042)。

Important scientific research projects of State Grid Corporation of China (B11-07-042).

条件和弧道状况的影响较大，除了在实际线路上进行测量之外，试验室模拟测定是唯一可行的办法。对于 1000 kV 的特高压双回线路，目前尚无利用实际线路进行试验的条件，并且实际线路试验有很大的局限性：方案不可能很多，次数有限，也不能任意改变试验条件。因此，在试验室条件下进行模拟试验是唯一的选择。本文通过大量的试验室试验，研究了 1000 kV 特高压输电线路在无补偿、正常补偿和过补偿状态下潜供电弧的自灭特性，最终确定不同运行条件下特高压输电线路潜供电弧的自灭特性，为 1000 kV 特高压电网建设中自动重合闸动作时间的确定提供依据。

1 试验理论和依据

潜供电弧是一个在大气中游动的开放性电弧，或称自由电弧。按其电路特性，属于“电容性电流”电弧，但它燃烧在已被“电感性短路电流”所离化了的弧道中，所以其燃烧特性与“电容性电路”产生的自由电弧不同。试验表明，当电流有效值达到 15 A 以上，电压梯度约为数 kV/m(有效值)时，即能维持这类电弧燃烧的稳定性，使之不能快速自灭(指燃烧时间超过 0.2 s 以上)^[11]。为了使潜供电弧快速自灭，必须研究潜供电流的大小和恢复电压(潜供电弧在空间游动自灭后，故障相上残留有一定的电压，这个电压即为潜供电弧的恢复电压)值的高低，这二者统称为潜供电弧的参数；此外，还必须研究一定参数下电弧的自灭时间。前者取决于系统结构和运行条件，即潜供电流及恢复电压的大小除了与线路单、双回路结构有关外，还与线路长度、线路电压、输送潮流、是否有补偿等因素有关；后者取决于潜供电弧参数和当时当地的环境条件(主要是风速)，即潜供电弧熄灭的快慢除了与潜供电弧参数的大小有关外，还与补偿情况及风速等其他多种因素有关。

潜供电弧参数计算实际上是电力系统的一种复杂故障方式下的电流电压计算，本文主要依托淮南—沪西特高压输变电工程，采用理论分析和数字仿真相结合的方法，利用已完成的特高压输电线路的潜供电弧参数值^[12-13]。通过等效计算简化线路，降低试验电压，用试验室模拟线路^[14]测出潜供电弧不同网络参数下的自灭时间，分析其自灭特性，并与中、外各国的系统实测结果及历年统计结果相比较，以确定试验室结果的正确性。本文强调，有关潜供电弧自灭时间的现场试验数据的局限性在于

以下 4 点：1) 试验参数变化范围有限；2) 试验次数有限，难于进行数理统计处理；3) 试验环境条件的一致性难以保持；4) 无法实时检测电弧燃烧区域内的风速。

图 1 为潜供电弧自灭特性的试验回路，图中： B_1 为回路总断路器， B_2 为引弧回路断路器， B_3 为补偿回路断路器； E 为电源电压； I_L 为电感电流； I_C 为电容电流； L' 为引弧电抗； C 为电容； L 为补偿电抗； I 为潜供电流； U_a 为电弧电压。本文要做的试验包括系统在无补偿($I_L=0$)、正常补偿($I_L < I_C$)和过补偿($I_L > I_C$)线路状态下潜供电弧的自灭试验。

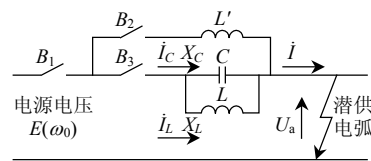


图 1 潜供电弧自灭特性试验回路

Fig. 1 Circuit of simulation test for secondary arc

图 2 为不同补偿情况下恢复电压的各种形态，其中：电流过零瞬间为 O'' ；恢复电压 u 的瞬时峰值点为 O' ； ω_0 是工频，其 1/4 周期是 5 ms，即图 2 中的 $O''A$ 。

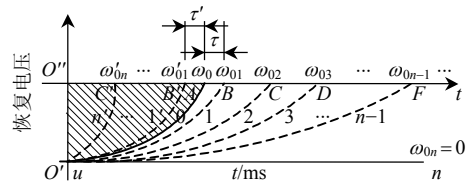


图 2 恢复电压的各种形态

Fig. 2 Various forms of the recovery voltage

在正常补偿情况下， ω 是低于 ω_0 的低频波； ω_0 是工频，其 1/4 周期是 5 ms(即图 2 中的 $O''A$)，低频的 1/4 周期时间大于 5 ms，如图中 B, C, \dots, F 等点所示。本文将各时间区段与 5 ms 之差命名为“补偿频率的差值”，以下简称“频差值时间”，以 τ (正常补偿)和 τ' (过补偿)表示，单位为 ms；过补偿时，波形即为曲线 0 左边的曲线 $1', \dots, n'$ 等，其 1/4 周期小于 5 ms。

当图 1 中 $X_L \rightarrow \infty$ 时，图 2 中 $\omega \rightarrow 0$ ，以曲线 n 表示(此时与横轴平行)，曲线 $1, 2, \dots, n-1$ 与曲线 $0(O''\omega_0)$ 之间的垂直距离(即 2 条曲线相同横坐标时在纵轴方向上的垂直距离)表示在各种补偿程度上的恢复电压上升情况。

显然，当 $X_L = X_C$ 、 $\omega = \omega_0$ (当略去补偿回路的内电阻，即无损耗)时，曲线 $0(O''\omega_0)$ 与曲线 $1(O''\omega_01)$ 完全重合，恢复电压为零，此时潜供电流也为零，

电弧快速自灭。

1965年及1994年试验结果^[11,15]已表明,当补偿度接近 $X_L=X_C$ 时,即潜供电流 I 值较小(例如在30A以下时,潜供电弧的自灭时间 ≤ 0.2 s(左右))时,补偿效果最佳,其恢复电压趋于零,图2对前期试验结果^[11,15]做出很好的说明。

当补偿较小时(即 $I_L \ll I_C$),恢复电压间的高度差由0与1之间逐渐变为0与 n 之间,潜供电弧电流为电容性电流。因此,分析各种补偿情况下的差异可以用 $\omega(\omega_{01} \rightarrow \omega_{0n})$ 与 ω_0 之差来表示。

系统在某些运行情况下,会出现“过补偿”,即试验回路图1中, $I_L > I_C$ (即 $X_L < X_C$),由此, $\omega > \omega_0$ (因 $\sqrt{X_L/X_C} < 1$),波形即为图2中的曲线0左边的曲线 $1', \dots, n'$ 等。在极端情况下, $X_L \rightarrow 0$,曲线 n' 逐渐接近垂直线 $O''O'$,此时的恢复电压特性完全转变为纯感性电路,其恢复电压特性与一般高压开关设备开断“端部短路”时的工况完全相同。在这种情况下,前文给定的“ τ ”将变为“ τ' ”(即其1/4周期与5ms之差为负值), τ 的极限可为 ∞ ,而 τ' 的极限为 -5 ms。 τ' 的变化量对恢复电压的上升陡度(较之 τ 的变化量)影响较大,因此,过补偿对潜供电弧的自灭是不利的因素。

本文根据以上理论进行特高压潜供电弧自灭特性研究,并与试验结果互为验证。

2 试验方案的确定

本次试验的主要内容是有补偿的潜供电弧自灭试验,但这种电弧自灭试验的参数组合数量众多,为减少工作量,本文根据上文中提到的试验原理进行了合理的组合,仅对有代表性、概括性的方案进行试验。选定方案的原则是:将潜供电流值由小到大分为若干等级,在每个等级范围内以大代小;将恢复电压梯度也分为若干等级,在每个等级范围内用梯度高的代表低的,即取相同等级内潜供电弧参数相对较苛刻的条件做试验。

一般情况下,潜供电流的大小与恢复电压梯度存在一定的联系。根据研究计算的潜供电弧参数值^[8],做出电流与电压梯度的关系,如图3所示,图中参数均为有效值。

结合图3和试验方案选定原则,本文合理地制定了无补偿试验方案、正常补偿试验方案、过补偿试验方案和高电压小电流试验方案(包括正常补偿和过补偿)。

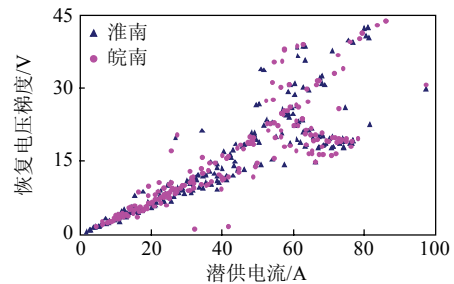


图3 淮皖线潜供电流和恢复电压关系图

Fig. 3 Relationship between the secondary arc and the recovery voltage of Huai-Wan lines

潜供电弧是在大气中自由燃烧的开弧,其自灭与否是单位时间内的能量平衡问题。当输入弧道的能量大于其散失的能量时,电弧将持续燃烧,否则将熄灭。而能量的计算遵守电路计算理论:在单位时间内单位弧长的输入能量是弧中电流与电压梯度的乘积,与弧道长度无关,因此单位长度弧道的特性可以代表整个弧道特性。本次试验中研究的潜供电弧以恢复电压梯度来代表电弧的弧长和恢复电压。

模拟试验采用试验室单相回路,降低试验电压,用较短的电弧代替特高压较长的电弧,测出潜供电弧不同网络参数下的自灭时间。

3 试验综述

本次潜供电弧的自灭特性试验是中国同类课题的第3批试验。

第1批:1957—1973年,研究对象是330kV及以下电力系统潜供电弧自灭特性(其中包括前电力部电力科学研究院及前西北电管局中心试验所的2批试验),该次试验以0.5~1.0m长的开弧模拟电力系统中长约3m的潜供电弧,研究了电压梯度为10kV/m的正常补偿和无补偿情况下潜供电弧的自灭特性。

第2批:1991—1994年,研究对象是500kV电力系统(也可以延用于750kV系统),该次试验以1.2~2m长的开弧模拟电力系统中3~7m长的潜供电弧,研究了电压梯度为16.8kV/m的正常补偿和无补偿情况下的潜供电弧的自灭特性。

第3批:2006年8月—2008年12月,即本次试验,研究对象是1000kV电力系统,以0.4~2m长的开弧模拟电力系统中长约10m的潜供电弧^[14]。此外,本文也进行了50.5kV/m及以下电压梯度的正常补偿、过补偿和无补偿情况下较小潜供电流(有效值5~7A)的潜供电弧自灭特性试验。

3 批试验次数达 7000 次以上, 试验结果互有补充, 为了便于使用这些经历了 50 年积累的成果, 本文结论中包含了上述各批次的试验数据, 同时, 也包含了数十年间积累的运行经验。

4 试验结果

4.1 风速的影响

弧道风速为自然风, 采用的风速取值为 1.5~2.0 m/s。当风速在 1.12 m/s 及以下时灭弧时间分散性变大。风速越大, 潜供电弧自灭时间越短, 当风速大于 3.0 m/s 时, 灭弧时间分散性较小, 但对于实际工程借鉴意义不大。

4.2 自灭时间

1) 无补偿潜供电弧。

多批次试验及运行经验表明, 当无补偿潜供电流为 10~12 A(基波有效值, 以下所指的电流都是如此)时, 电弧在 0.2 s 内快速自灭; 当无补偿潜供电流为 10 A 及以下时, 自灭时间小于 0.1 s。因此, 不论恢复电压如何, 如能维持潜供电流值小于 10 A, 则有利于快速自灭。

2) 正常补偿潜供电弧。

正常补偿时, 在第 2 批试验中能在 0.2 s 内快速自灭的(16.8 kV/m, $\tau=1.468$ ms, 30 A)潜供电流可扩大至(20 kV/m, $\tau=1.2$ ms, 35 A)。

3) 过补偿潜供电弧。

在补偿条件下(τ 及 τ')约为 1.5 ms 时的自灭时间相近, 这表明, 它们同属于容性恢复电压, 在其恢复电压的最初阶段, 灭弧条件相似; 当 $\tau'>1.5$ ms 时, 过补偿的灭弧时间逐渐加长。

4) 高电压小电流潜供电弧。

在高恢复电压梯度下(50.5 kV/m), 只要电流值在 8 A 以下, 电弧均能在 0.2 s 内自灭, 这表明, 这类小电流下难于建立稳定燃烧的电弧, 恢复电压因素属于次要地位。

5) 电压梯度的影响。

电流大于 10 A 时, 电压梯度的增大使灭弧时间逐步增大。当梯度大于 16.8 kV/m 时, 大部分不能快速自灭。

4.3 单相重合闸时间

重合闸时间: 以系统发生单相短路故障, 在故障相上出现单相短路电流作为计时的起始零点, 系统上的故障相上出现工作电流的瞬间为重合闸成功。本文将单相重合闸时间定为:

1) 0.4~0.5 s 为快速单相重合闸, 相应的电弧自

灭时间 90% 概率值为小于 0.2 s。

2) 大于 0.5 s 为非快速重合闸, 相应的电弧自灭时间的 90% 概率值大于 0.2 s。

4.4 重合闸时间的确定原则

在灭弧时间确定后, 为保证系统重合时弧道绝缘强度恢复到能承受系统工作电压的水平, 建议附加的绝缘恢复时间为 0.1 s(注: “绝缘恢复时间”在中国 330 kV 系统实测中, 曾短到 0.04 s), 另增加裕度 0.1 s。

以上各批次的系统单相短路持续时间均定为 0.1 s, 因此, 单相重合闸时间=0.1 s+ 自灭时间(90% 概率值上限)+0.1 s+0.1 s。

4.5 单相重合闸时间推荐值

综上所述, 提出下列灭弧时间 90% 概率值^[16]及单相重合闸的重合时间, 如表 1、2 所示。

表 1 无补偿时单相重合闸推荐时间
Tab. 1 Recommended single-phase reclosing time on the compensation-free transmission lines

恢复电压 梯度/(kV/m)	潜供电流 有效值/A	自灭时间 (90%概率值)/s	单相重合闸 推荐时间/s
10.0	12.0	0.100~0.150	0.4~0.5
	15.0	0.150~0.250	0.5~0.6
	18.4	0.250~0.400	0.70
	21.0	0.310~0.490	0.80
	24.0	0.370~0.540	0.80
	30.0	0.420~0.580	0.90
16.8	42.0	0.520~0.650	1.00
	12.0	0.300~0.500	0.80
	15.0	0.400~0.600	0.90
	18.4	0.500~0.700	1.00
	21.0	0.600~0.780	1.10
	24.0	0.660~0.850	1.15
20.0	30.0	0.740~0.940	1.25
	42.0	0.900~1.110	1.40
	18.4	0.600~0.800	1.10
	21.0	0.811~0.955	1.30
	24.0	0.820~1.020	1.30
	30.0	0.846~1.164	1.50
23.0	42.0	1.172~1.417	1.70
	18.4	0.700~1.040	1.30
	21.0	0.742~1.163	1.50
	24.0	1.090~1.300	1.60
	30.0	1.391~1.510	1.80
	42.0	1.246	1.80
30.0	18.4	1.270~1.480	1.80
	21.0	1.391~1.536	1.90
	24.0	1.400~1.650	1.90
	30.0	1.491	1.90
	42.0	2 s 不灭	建议不采用

由表 1 可以看出:

1) 电压梯度为 20 kV/m 及以上、电流为 18.4 A 及以上无补偿情况下, 潜供电弧不可能在 0.2 s 内快

表2 有补偿潜供电弧自灭时间推荐值
Tab. 2 Recommended single-phase reclosing time on the compensation transmission lines

补偿方式	恢复电压梯度/(kV/m)	潜供电流/A	$\tau(\tau')$ /ms	风速范围/(m/s)	90%概率自灭推荐值/s	备注	单相重合闸推荐时间/s
正常补偿	12	28.0	0.881	1.5~2.0	0.2 s 内自灭		0.5
		35.0	1.200	1.5~2.0	0.2 s 内自灭		0.5
		40.0	1.477	1.5~2.0	0.636~0.827		1.1
	20	28.0	0.881	1.5~2.0	0.2 s 左右		0.5
		35.0	1.200	1.5~2.0	0.2 s 左右		0.5
		40.0	1.477	1.5~2.0	0.704~0.827		1.1
	25	48.0	2.030	2.00	1.260		1.6
		48.0	2.030	1.5~2.0	1.295	风速低于 1 m/s 时出现 2 s 不灭	1.6
	30	65.0	3.452	1.12	2 s 不灭		不采用
		80.0	2.319	2.0~2.5	0.985~1.04	风速 1.5 m/s 时出现 2 s 不灭	不采用
	45	80.0	2.319	1.5~2.5	不灭		
	过补偿	12	18.4	0.837	0.90	0.2 s 内自灭	
			0.652	0.90	0.397		0.7
15		40.0	1.464	1.5~2.0	0.644~0.716		1.0
			1.487	0.90	0.808		1.1
20		18.4	0.837	0.90	0.252		0.6
			1.464	1.5~2.0	0.846~0.937		1.2

速自灭。

2) 电压梯度为 20 kV/m 以下、风速为 2.0 m/s 及以下、潜供电流为 20 A 及以下时, 潜供电弧在 1 s 内能稳定自灭, 潜供电流 40 A 及以下时可在 1.5 s 内稳定自灭。

3) 电压梯度 23 kV/m, 风速 2.0 m/s 及以下, 潜供电流 30 A 及以下, 潜供电弧 1.5 s 内能稳定自灭, 潜供电流 40 A 时 2 s 内已不能稳定自灭。

4) 电压梯度 30 kV/m, 风速 2.0 m/s 及以下, 潜供电流 20 A 及以下时 1.5 s 内能稳定自灭, 潜供电流 30 A 及以下时 2 s 内已不能稳定自灭。

无补偿情况下潜供电弧自灭特性曲线如图 4 所示。

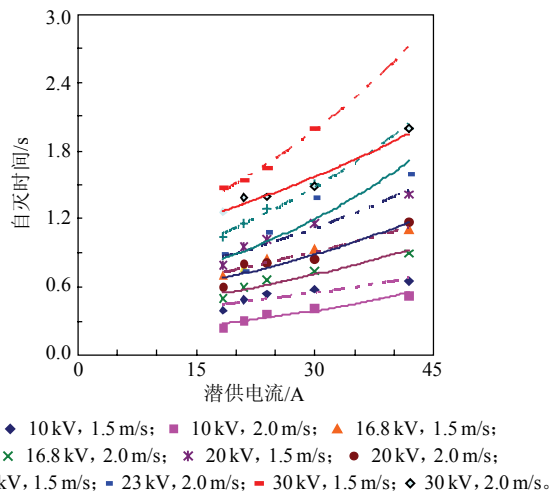


图4 无补偿情况下潜供电弧自灭特性

Fig. 4 Secondary arc extinction characteristics on the compensation-free transmission lines

从表 2 可以看出, 正常补偿时, 电压梯度 20 kV/m 及以下, 潜供电流 35 A 及以下时, 潜供电流均能在 0.2 s 左右快速自灭, 潜供电流 40 A 时潜供电弧自灭时间增大到 0.7 s 左右, 可以推测潜供电流为 35~40 A 之间某一值时, 其自灭时间有迅速增大的现象。

过补偿时, 潜供电流为 18.4 A, 电压梯度在 20 kV/m 及以下时, 潜供电弧能在 0.2 s 内快速自灭, 潜供电流为 40 A, 电压梯度在 15~25 kV/m 时, 潜供电弧自灭时间为 0.644~0.937 s, 已不能快速自灭。

在本文高电压小电流范围内, 潜供电弧在 0.2 s 内均可快速自灭。

表 2 数据表明, 相同恢复电压梯度下, $\tau(\tau')$ 越大, 潜供电弧熄灭得越慢, 综合 3 批次试验数据可知, 正常补偿情况下, $\tau > 1.468$ ms 时, 潜供电弧不能快速自灭。

5 结论

特高压输电线路潜供电弧实验室模拟试验是唯一行之有效的潜供电弧自灭特性研究方法, 本文采用实验室单相试验回路, 从电弧理论和试验结果两方面对特高压输电线路潜供电弧自灭特性进行了分析, 得出了科学合理的试验数据, 通过实验室模拟试验, 得出以下结论:

1) 在模拟试验方面提出了“频差时间”的定义, 有效地简化了试验方案, 并通过试验验证了其理论的正确性。

2) 通过实验室模拟试验, 研究了线路在无补偿、正常补偿和过补偿状态下, 不同风速、不同恢复电压梯度和不同潜供电流值时的潜供电弧自灭特性, 本文也给出了在高恢复电压梯度下的潜供电弧自灭特性。

3) 试验结果可作为 1000 kV 特高压输电线路单相重合闸时间整定值的依据。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 1, 167-168.
Liu Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005: 1, 167-168(in Chinese).
- [2] 林集明, 班连庚, 王晓刚. 中国特高压系统电磁暂态问题探讨[C]//特高压输电技术国际研讨会. 北京: 中国电机工程学会, 2005: 14-21.
Lin Jiming, Ban Liangeng, Wang Xiaogang. The discussion of the electromagnetic transient problems of China UHV power system[C]//International Workshop on UHVAC Transmission Technology. Beijing: Chinese Society for Electrical Engineering, 2005: 14-21(in Chinese).
- [3] 谷定燮. 我国特高压输电系统的过电压和绝缘配合[J]. 中国电力, 1999, 32(4): 65-68.
Gu Dingxie. Over-voltage and insulation coordination on UHV transmission system in China[J]. Electric Power, 1999, 32(4): 65-68 (in Chinese).
- [4] Dudurych I M, Gallagher, Rosolowski E. Arc effect on single-phase reclosing time of a UHV power transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(2), 2004: 854-860.
- [5] Prikler L, Kizilcay M, Bán G, et al. Improved secondary arc models based on identification of arc parameters from staged fault test records[C]//14th Power Systems Computation Conference. Sevilla Spain: PSCC, 2002: 24-28.
- [6] Goda Y, Matsuda S, Inaba T. Forced extinction characteristics of secondary arc on UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 18(3), 1993: 1322-1330.
- [7] 颜湘莲, 陈维江, 王承玉, 等. 计及风影响的潜供电弧自熄特性计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 1-6.
Yan Xianglian, Chen Weijiang, Wang Chengyu, et al. Computation of secondary arc self-extinction behavior with the influence of wind[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 1-6(in Chinese).
- [8] 林莘, 何柏娜, 徐建源. 潜供电弧的仿真分析[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 8-10.
Lin Xin, He Baina, Xu Jianyua. Simulation and analysis of secondary arc[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 8-10(in Chinese).
- [9] 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 Russian).
- [10] Nava J H V, Rivas R A, Urdaneta A J. A probabilistic approach for secondary arc risk assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(2), 2004: 657-662.
- [11] 曹荣江, 朱拱照, 崔景春. 关于超高压线路潜供电弧自灭特性的研究(实验室中的模拟试验)[R]. 北京: (原)水利电力部电力科学研究院, 1965.
Cao Rongjiang, Zhu Gongzhao, Cui Jingchun. Secondary arc self-extinction research about EHV transmission lines (simulation test in the laboratory)[R]. Beijing: Electric Power Research Institute of Water Conservation Electric Power Department, 1965(in Chinese).
- [12] 张媛媛, 班连庚, 林集明, 等. 1000 kV 同塔双回输电线路潜供电流研究[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 87-92.
Zhang Yuanyuan, Ban Liangeng, Lin Jiming, et al. Research on secondary arc current of 1000 kV double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 87-92(in English).
- [13] 宋杲, 林集明, 曹荣江, 等. 1000 kV 特高压交流同塔双回输电线路潜供电弧及其控制研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
Songgao, Lin Jiming, Cao Rongjiang, et al. The research of secondary arc and its control in 1000 kV UHV with double-circuit transmission lines[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008(in Chinese).
- [14] 和彦森, 宋杲, 曹荣江. 特高压同塔双回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 on the same tower[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 4-7(in Russian).
- [15] 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. The simulation research of secondary arc extinction characteristic in the electrical power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 73-78(in Chinese).
- [16] 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)[R]. 武汉: (原)水电部武汉高压研究所, 1975.
Cao Rongjiang, Zhu Gongzhao, Cui Jingchun. Research of the secondary arc continuous phenomena about EHV transmission lines (part II)[R]. Wuhan: Wuhan High Voltage Research Institute of Water Conservation Electric Power Department, 1975(in Chinese).



和彦森

收稿日期: 2010-11-25。

作者简介:

和彦森(1981), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统过电压、电弧试验、高压电器等, ymhe@epri.sgcc.com.cn;

宋杲(1972), 男, 高级工程师, 所长助理, 主要从事高压电器、电力系统过电压及电弧试验等工作, songgao@epri.sgcc.com.cn;

曹荣江(1927), 男, 博士, 教授级高工, 曾多次主持和承担过电力系统潜供电弧自灭特性的试验研究工作。

(编辑 胡琳琳)