

特高压输电系统的过电压问题

孙才新¹, 司马文霞¹, 赵 杰², 饶 宏², 张 弥²

(1. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510620)

摘要: 介绍了国外特高压输电的发展现状, 并着重阐述了目前国外特高压系统过电压存在的问题。针对内部过电压, 分析了工频电压升高、潜供电流以及操作过电压所引起的问题, 同时列出了各自可以采用的限制措施; 针对防雷保护问题, 分析了特高压输电线路的反击耐雷性能、绕击耐雷性能及绕击防护措施, 并归纳比较了反击耐雷水平和绕击耐雷水平的计算方法。
关键词: 特高压; 输电系统; 过电压
中图分类号: TM 721; TM 86 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)09-0005-05

1 发展特高压输电的意义和现状

根据国际大电网会议的定义, 最高线电压为 1 000 kV 以上称为特高压(UHV)。由于特高压输电可实现远距离、大容量、大区域电网的互联, 可降低输电成本, 因此, 前苏联、日本、美国、意大利等发达国家都在致力于特高压输电技术的研究^[1]。

前苏联作为特高压输电的先行者, 于 1981 年开始建设 1 150 kV 特高压输电线路^[2], 1983 年建成埃基巴斯图兹—科克切塔夫—库斯坦耐特 500 km 的第一段线路, 目前线路长度已达 2 500 km。因前苏联的解体使其特高压输电工程发展基本停滞, 已建成线路的运行电压根据需要有时运行在 500 kV, 有时运行在 1 150 kV。线路在运行中变压器、断路器、电抗器和避雷器等电气设备情况良好, 但线路的雷击跳闸率偏高, 重要原因是在转角塔容易发生雷电绕击导线, 这与线路杆塔的设计有关。

因国土有限、线路走廊十分困难, 为提高系统稳定水平和输电能力的需要, 日本成为特高压输电的后续者。东京电力公司于 1999 年建成从福岛和柏崎刈羽核电站的 2 条 1 000 kV 送出线^[3], 在中部的西群马变电站汇合后再通过 2 条 1 000 kV 线路南送到东京地区外围的 500 kV 网络上。共建有 976 km 线路, 采用 8 分裂导线, 平均塔高 90 m 以上, 目前是以 500 kV 降压运行。在建设过程中重点研究了输电线路的三相不平衡、短路电流中直流分量的衰减、快速综合重合闸的应用、无功补偿和内过电压等技术问题, 并成功地将过电压限至相当低的水平。

1971 年意大利国家电力局发起对 1 000 kV 输电系统的研究^[4], 1988 年在意大利西北部萨维托(Suvereto)建立了 1 000 kV 工程试验场, 与一 1 050 kV 变电所相邻。经过三个阶段的工程试验研究, 在绝缘水平的选择、线路设计、电气设备制造、线路电场效应等方面研究取得了重要成果。

我国水利和煤炭资源主要分布在西部, 电力负荷中心主要在东部, 西电东送的输电容量大、距离长和大区域的联网使已有的 500 kV 系统难以支撑^[5]。我国从西电东送和建设国家骨干网架的战略考虑, 特高压交直流输电线路的建设势在必行。本文仅简述特高压输电系统中的过电压问题及其解决思路。

2 内部过电压问题

在特高压系统设计中, 面临的重大问题之一就是如何将过电压等危害系统安全的电磁暂态问题限制在一个合理的水平内。大容量、远距离的特高压系统自身的无功功率很大, 每 100 km 的 1 000 kV 线路无功可达 530 Mvar 左右, 这使得特高压系统:

- a. 在甩负荷时可能导致严重的暂时过电压;
- b. 在正常运行时负荷变化将给无功调节、电压控制以及单相重合闸潜供电弧熄灭等造成一系列问题;
- c. 长空气间隙绝缘的饱和特性及复杂环境对绝缘特性的影响和电气设备制造的因素都给过电压的限制提出更高的要求。

在特高压系统的绝缘选择上, 操作过电压是主要的决定因素, 工频过电压有一定影响, 谐振过电压基本不予考虑。国内外对特高压输电系统内部过电压的研究主要集中在操作过电压和工频过电压^[6~10](主要是甩负荷引起的工频电压升高), 各国针对具体情况考虑的内过电压水平如表 1 所示。

表 1 不同国家特高压系统的内部过电压倍数
Tab.1 The inner overvoltage multiples of UHV system in some countries

国别	最高工作电压 U_m /kV	工频暂态 过电压倍数	操作 过电压倍数
日本	1 100	1.30, 1.50	1.60
前苏联	1 200	1.44	1.60(1.80)
意大利	1 050	1.35	1.70
美国 BPA	1 200	1.30	1.50
美国 AEP	1 600	1.10	1.60
中国建议值	1 100	1.30, 1.40	1.60

2.1 工频电压升高

工频电压升高主要是由空载线路电容效应、不对称接地故障和甩负荷等原因引起的,与系统结构、容量、参数及运行方式有关。由于特高压输电线路的充电功率大、线路长,所以工频暂态过电压高。当采用避雷器限制这种过电压时,为了防止避雷器的热崩溃,对特高压系统工频暂态过电压的控制不仅要降低幅值,而且还要控制持续时间。因此目前采用并联电抗器是限制工频过电压的有效措施。由于运行方式变化,线路上的无功功率变化很大,为了无功平衡和调压,要求并联电抗器应能随线路输送功率而自动调节电感量,因此目前国内外正在积极研究可控电抗器。

日本的特高压系统中并无并联电抗器,而是采用继电保护方案限制工频过电压的持续时间^[6]。虽然它不限制工频过电压幅值,但缩短了工频过电压的持续时间,减小了金属氧化物避雷器(MOA)热负荷,可防止避雷器的热崩溃,有利于选择 MOA 的额定电压。在可控电抗器技术尚不成熟的条件下,我国可以借鉴这种方式。

继电保护的原理是^[6]:在 MOA 接地引下线上,用 TA 取流过 MOA 电流信号,甩负荷时,线路末端过电压较高,此电流幅值和持续时间大于某预定值,则立即向线路首端发出跳闸信号,使过电压消除。

因 MOA 具有优良耐受短时工频过电压的能力,采用此措施后,MOA 的额定电压 U_r 可以选用 1.3 p.u.,而不是通常的原则,即 $U_r \geq \text{TOV}(1.5 \text{ p.u.})$;相应地也使 MOA 的残压下降和使 UHV 过电压降低。

由于我国拟建的特高压线路都在 1000 km 左右,必须使用高压并联电抗器(高抗)补偿^[8,9]。尽可能考虑使用可控或可调高抗,即在重负荷时,运行在低补偿度,有利于无功平衡和提高输送能力;当出现工频过电压时,快速控制在高补偿度。

因此,只要采用合适的限制措施,我国特高压系统的工频过电压可以限制在 1.3 p.u.(0.5~1 s)和 1.4 p.u.(0.2 s)以下。

2.2 潜供电流

在特高压系统中,不仅电压高而且线路的静电感应分量也大,相应在故障相断开后,由正常相静电感应产生的二次电弧电流(潜供电流)也很大,且持续时间长。因此在采用快速重合闸时,故障点二次电弧的灭弧问题是保证重合是否成功的关键。能否使特高压线路的潜供电弧快速自灭,是能否保证特高压系统安全稳定运行的关键之一。超高压系统中,一般采用并联电抗器^[11]等方法达到限制潜供电流的目的。但我国特高压系统中,如仍用固定并联电抗器,则无功平衡和调压困难较大。为解决此问题,日本采用的一种新方法——高速接地开关(HSGS)方法可以借鉴^[7,8,12],接线如图 1 所示。

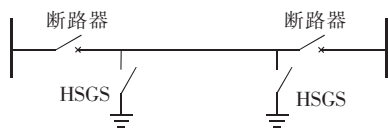


图 1 高速接地开关

Fig.1 The high speed grounding switch

高速接地开关操作过程描述如下:线路发生故障后约 80 ms,两端线路断路器跳开;120 ms 时完成对两端断路器已经分闸的检查和确认;180 ms 时发出高速接地开关投入的指令;280 ms 时高速接地开关投入,线路接地,电弧熄灭;700 ms 时发出打开接地开关的指令;800 ms 时接地开关分闸;850 ms 时完成对高速接地开关已经打开的检查和确认;1000 ms 时线路两端断路器重合闸。整个无电流间隙时间小于 1 s,有利于系统稳定。

在特高压系统中加快潜供电弧熄灭的措施有:

- 利用并联电抗器;
- 采用高速接地开关 HSGS。

2.3 操作过电压

操作过电压是决定特高压系统绝缘水平的最重要依据。特高压系统主要考虑 3 种操作过电压:合闸(包括单相重合闸)、分闸和接地短路过电压。

限制操作过电压的措施^[6,8~10,13~15]有:依靠合闸、分闸电阻;依靠优良性能的避雷器。最大过电压倍数(λ)与并联电阻值(R)的关系如图 2 所示。

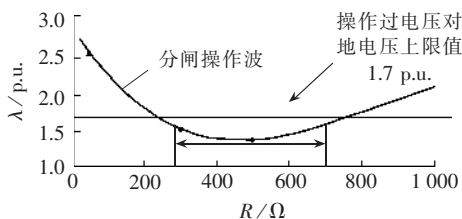


图 2 最大过电压倍数与并联电阻值的关系

Fig.2 The relationship between overvoltage multiple and parallel resistance

最大操作过电压为 1.6~1.7 p.u.(相对地),2.6~2.8 p.u.(相对相);2%统计过电压为 1.5~1.6 p.u.(相对地),2.6~2.7 p.u.(相对相)。在 500 kV 系统中断路器不设分闸电阻,因为 SF6 断路器一般被认为不会重燃。对于 UHV 系统,两端电势相角差不大时,其解列过电压就有可能超过 1.6 p.u.,所以要把操作过电压限制在 1.6 p.u.以下,就要在断路器上装分闸电阻(合闸和分闸用一个电阻)。其目的是限制解列过电压。

目前,特高压系统限制操作过电压的主要措施包括^[16,17]:

- 使用 MOA,它是限制操作过电压的主要手段之一;
- 使用断路器合闸电阻限制合闸过电压;
- 考虑使用控制断路器合闸相位方法降低合闸过电压的可行性;
- 使用断路器分闸电阻限制甩负荷分闸过电压;

e. 选择适当的运行方式降低操作过电压。

2.4 内部过电压的计算方法

用于内部过电压的仿真计算方法主要有 ATP-EMTP, Saber, PSpice, Matlab-Simulink 等^[10,13~15,18]。ATP-EMTP 是以 EMTP 为核心的图形化、交互式电磁暂态分析软件,克服了 EMTP 编程不方便的缺点。基于贝杰龙法的电磁暂态过程计算程序 ATP-EMTP 是把求解分布参数线路波过程的特性线法和求解集中参数电路暂态过程的梯形法结合起来,形成的一种数值计算方法。

综上所述,大量的研究和已有的运行经验表明,特高压系统的内部过电压不存在特殊的技术难题。通过采用 ATP-EMTP 等电磁暂态仿真计算研究,选择合理的限制过电压的措施可将特高压系统的内部过电压限制在一定的水平。

3 防雷保护问题

3.1 雷击跳闸率偏高

俄罗斯对埃基巴斯图兹—科克切塔夫 UHV 线总长为 494 km 的 1 150 kV 线路 1985~1992 年的雷电活动情况统计研究表明^[19],雷电跳闸数约占整条 1 150 kV 线路总跳闸率的 94%。分析认为这与杆塔形状和导线布置有关,即带拉线的 V 型金属塔和转角塔由 3 个基本立柱以及 1 个单独的附加塔柱构成,地线保护角为 $24^{\circ}\sim 28^{\circ}$ 。日本为了减小绕击,特高压线路采用负保护角^[20],地线比导线外伸 2.5 m,保护角就比前苏联的要小得多。则线路雷电事故率约为 0.3 次/(100 km·a)。

3.2 雷击引起的相-相故障

前苏联的研究发现,即使杆塔冲击接地电阻达到 $10\ \Omega$,雷击杆塔时绝缘子串闪络的概率仍小到可以忽略;同时,当发生雷电绕击导线时,雷电流也小于绝缘子串的保护水平。然而,相对于一般档距的高压线路,在档距比较长的 750 kV 和 1 150 kV 线路上,雷击避雷线引起的过电压高达 10 MV 量级的雷闪数量(概率)急剧增加。这样高的电压,虽然持续时间短(几微秒),也足以引起避雷线-相导线间隙击穿。据此,有关文献^[19]提出了一个新观点,认为特高压输电线路雷击跳闸的主要原因是:雷电击中档距中间部位的避雷线会引起避雷线-相导线间隙击穿放电,进而引起线路跳闸。

研究表明,采用避雷线负保护角并不能避免这种放电发生。可以通过减小避雷线-相导线间隙击穿概率提高避雷线保护的有效性。

4 雷击过电压研究现状

CIGRE-NO.33 研究委员会早在 20 世纪 70 年代就对特高压输电线路的防雷问题进行了一系列的研究,对特高压线路的反击和绕击机理进行了阐释,并利用击距法、蒙特卡洛法和参数限制法对如图

3 所示的常规特高压杆塔和非常规特高压杆塔的反击跳闸率和绕击跳闸率进行了计算。但由于其计算方法大部分仍然是沿用高压及超高压线路耐雷性能的计算方法,对特高压线路防雷问题与高压和超高压线路防雷问题的不同之处考虑不足,很多结论也缺乏实际运行经验的支撑。

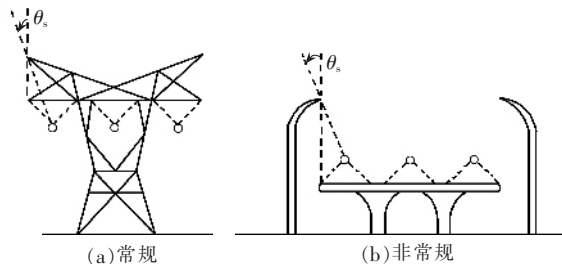


图 3 常规和非常规特高压杆塔

Fig.3 The conventional and unconventional towers

由于特高压线路杆塔较高,杆塔波阻抗的计算、特高压线路的雷电暂态响应特性、反击及绕击耐雷性能计算方法都与超高压线路不同,如防雷计算中应考虑工作电压的影响,当绝缘子串长增加时,其正、负极性 50% 的冲击击穿特性是否会发生变化,当杆塔增高时,电气几何模型存在的不足、线路档距对雷击跳闸的影响等,虽然国内外的研究者也进行了一系列的研究,提出了一些防雷设计方案如采用负保护角和加装 MOA 等,但这些研究仍然对特高压线路绕击的机理阐释清楚。

4.1 反击耐雷性能

CIGRE-NO.33 委员会利用规程法对 1 250 kV 线路的反击耐雷性能进行了计算,指出由于 1 250 kV 线路的线路绝缘水平较高,其反击耐雷水平通常在 200 kA 以上,而实际上雷电流难以达到这种水平,因而特高压线路的反击跳闸率很低。但同时,该委员会还指出,杆塔的冲击接地电阻、杆塔的波阻抗以及绝缘水平对特高压线路的反击耐雷性能有很大的影响。在设计特高压线路时应尽量减小杆塔的冲击接地电阻和波阻抗以及提高绝缘子和空气间隙的绝缘水平,以提高特高压线路的反击耐雷水平。特高压线路杆塔较高,通常在 50 m 以上,显然用简单的集中参数电路模拟杆塔的波阻抗已很难满足要求,因而利用高压与超高压线路的波阻抗计算方法很难精确地确定特高压线路杆塔的波阻抗,而杆塔波阻抗与反击耐雷性能密切相关,因此,计算和测量特高压线路杆塔的波阻抗对研究特高压线路的反击耐雷性能有重要的意义。

现有的特高压线路反击耐雷水平的计算方法主要是沿用高压及超高压线路反击耐雷水平的计算方法,这些方法主要有:规程法;行波法;蒙特卡洛法;故障树法;EMTP(或 ATP-EMTP 法)。这些方法有各自的优点及缺点,应用较广的是规程法和 EMTP 法,规程法主要运用于电力部门的输电线路防雷设计中,但它实际上是一种简化的计算方法,与实际的雷击过程有一定的差异。随着 EMTP 发展到 ATP-

EMTP,避免了先前编程繁琐的缺点,在防雷计算中得到了广泛的应用。

雷击避雷线档距中央引起的避雷线-相导线之间的空气间隙击穿导致线路跳闸必须引起高度重视。

研究表明:档距增加引起雷击跳闸率增加,从输电可靠性的角度看,有关文献提出 1 150 kV 线路的最佳档距为 400~600 m 是合适的。

4.2 绕击耐雷性能研究

运行经验表明,特高压输电线路雷击跳闸率中绕击跳闸率所占的比例远远大于反击跳闸率所占的比例。特高压系统的绕击性能决定了线路的雷击跳闸率,减小绕击率是防雷保护的关键。实际运行中雷击跳闸率偏高与线路防雷分析的方法有关。目前,特高压输电线路绕击耐雷水平的计算方法仍然是沿用高压及超高压输电线路绕击耐雷水平的计算方法,主要有:规程法;电气几何模型法(EGM);改进电气几何模型法;先导模型法;概率模型法。

各种输电线路雷电屏蔽分析模型,对于同一线路的分析计算结果差别较大,而且对于各种模型的争议很大,根本原因在于各种输电线路雷电屏蔽分析模型都建立在一定的假设基础上,对雷击输电线路的物理过程还不够清晰,难以对该过程进行全方位精确模拟。因此基于长空气间隙的放电机理,并考虑大气环境、地形地貌对雷云放电过程的影响,从而建立精确的输电线路雷电屏蔽分析模型,正确选择防雷保护的措施,才能保证系统可靠地运行。

4.3 绕击的防护设计

在以往 500 kV 及以下输电线路防雷中,国内外都是应用电气几何模型^[21]确定避雷线的保护范围,并认为当 2 根避雷线时,只要其间的距离不超过避雷线与中间线路高度差的 5 倍,中间导线被绕击的概率极小,这种防雷设计思想对特高压线路是否适合值得探讨。前苏联 1150 kV 线路最初是按 500 kV 运行,升至额定电压运行后,发现雷击跳闸率升至原来的 5 倍,且事故主要是绕击引起,这说明电气几何模型未考虑电压的影响所暴露出的不足。另外,特高压线路双避雷线间的距离很大,采用常规的三相导线水平排列,中间导线被绕击的概率^[22]能否被忽略是值得探讨的问题。因此特高压的防雷应考虑以下几点:

- a. 采用较小的保护角,减小边相导线的绕击概率;
- b. 改进导线布置,减小中间导线的绕击概率;
- c. 采用避雷器降低雷击线路的过电压;
- d. 防止绕击产生的变电站侵入波,因此,需要在变电站加装 MOA。

5 结论

a. 虽然目前世界上 1000 kV 的特高压输电系统均是降压运行,但在额定电压和降压下运行情况良好。

b. 只要采用合适的限制措施,我国特高压系统的工频过电压可以限制在 1.3 p.u.(0.5~1 s)和 1.4 p.u.(0.2 s)以下。

c. 采用并联电抗器、高速接地开关用以消除潜供电弧,实现线路的重合闸,保证系统的稳定运行。

d. 采用带并联电阻的断路器和优良性能的 MOA,可将特高压输电线路的操作过电压限制在 1.6~1.7 p.u. 以内。

e. 特高压线路的雷击跳闸率几乎占整个特高压线路跳闸率的 90% 以上,绕击耐雷水平低,减小绕击率是特高压防雷问题的关键。

f. 特高压线路本身的特点决定了在防雷设计中不能简单地将高压和超高压线路的防雷设计进行套用,也不能简单地延伸高压和超高压线路的绝缘水平作为特高压线路的绝缘水平。

g. 特高压线路防雷问题中的一些新特点增加了特高压线路防雷设计的难度,应进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 陈 勇,万启发,谷莉莉,等. 关于我国特高压导线和杆塔结构的探讨[J]. 高电压技术,2004,30(6):38-41.
CHEN Yong, WAN Qi-fa, GU Li-li, et al. Discussions on UHV conductors and tower structure in China[J]. **High Voltage Engineering**, 2004, 30(6):38-41.
- [2] 贺以燕. 意、日、俄、乌特高压输变电设备科研、制造及输电系统简介[J]. 变压器,2003,40(1):26-30.
HE Yi-yan. Brief introduction of research, manufacture of UHV transmission and transformation equipment and its transmission system in Italy, Japan, Russia and Ukraine [J]. **Transformer**, 2003, 40(1):26-30.
- [3] 韩启业,张湘南. 日本东京电力 1000 kV 特高压输变电系统[J]. 华中电力,1999,12(4):63-65.
HAN Qi-ye, ZHANG Xiang-nan. 1000 kV ultrahigh voltage transmission system in Tokyo electric power system [J]. **Center China Electric Power**, 1999, 12(4):63-65.
- [4] ARDITO A, DENIGRIS M, GIORGI A, 等. 意大利 1000 kV 工程[A]. 特高压输电技术国际研讨会[C]. 北京, 中国:[出版者不详], 2005. 1-8.
ARDITO A, DENIGRIS M, GIORGI A, et al. 1000 kV power engineering in Italy[A]. **International Workshop on UHVAC Transmission Technology** [C]. Beijing, China: [s.n.], 2005. 1-8.
- [5] 谷定燮. 我国发展特高压输电的前景[J]. 高电压技术, 2002, 28(3):28-31.
GU Ding-xie. The prospect of developing UHV transmission system in China[J]. **High Voltage Engineering**, 2002, 28(3):28-31.
- [6] 谷定燮,陆宠惠. 日本特高压系统过电压和绝缘配合[J]. 中国电力,1998,31(11):67-69.
GU Ding-xie, LU Chong-hui. Over-voltage and insulation coordination on ultra-high voltage system in Japan [J]. **Electric Power**, 1998, 31(11):67-69.
- [7] 陆宠惠,万启发,谷定燮,等. 日本 1000 kV 特高压输电技术[J]. 高电压技术,1998,24(2):47-49.
LU Chong-hui, WAN Qi-fa, GU Ding-xie, et al. The 1000 kV UHV transmission technology in Japan[J]. **High Voltage Engineering**, 1998, 24(2):47-49.
- [8] 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 Ding-xie. Over-voltage and insulation coordination on UHV transmission system in China[J]. **Electric Power**, 1999,32(4):65-68.
- [9] 朱家骝,修木洪,舒廉甫. 我国电网采用特高压送电方案的研究——过电压及绝缘配合部分[J]. 中国电力, 1996,29(2):40-45.
- ZHU Jia-liu, XIU Mu-hong, SHU Lian-fu. Study on China EHV transmission scheme—Overvoltage and insulation coordination[J]. **Electric Power**, 1996,29(2):40-45.
- [10] CIGRE Working Group. Switching overvoltages in EHV and UHV systems with special reference to closing and reclosing transmission lines[J]. **Electra**, 1973, (30):70-122.
- [11] BAN G, PRIKLER L, BANFAI G. 750 kV reactive power control, automatic reclosing and overvoltage protection [A]. **IEEE Power Tech. Conference** [C]. Bologna, Italy: IEEE, 2003. 23-26.
- [12] 何俊佳, 秦实宏, 张汉明, 等. 日本的 1000 kV 级高压开关设备[J]. 高压电器, 2000, 36(5):59-61.
- HE Jun-jia, QIN Shi-hong, ZHANG Han-ming, et al. 1000 kV high voltage switch apparatus in Japan[J]. **High Voltage Apparatus**, 2000, 36(5):59-61.
- [13] 盛 鹏, 李永丽, 李 斌, 等. 特高压输电线路过电压的研究和仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(6):13-18.
- SHENG Kun, LI Yong-li, LI Bin, et al. Research and simulation of over-voltage in UHV transmission lines [J]. **Proceedings of the EPSA**, 2003, 15(6):13-18.
- [14] SHIMODA N, TAGUCHI K, NEMOT T, et al. Suppression of very fast transient overvoltages across insulation flange of 1000 kV GIS[A]. **High Voltage Engineering Symposium** [C]. [s.l.]: IEE, 1999. 415-418.
- [15] KIM Jeong-boo. Switching overvoltage analysis and air clearance design on the KEPCO 765 kV double circuit transmission system[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 2000, 15(1):381-386.
- [16] OKAMOTO H. 东京电力 1000 kV 交流输电工程系统设计[A]. 特高压输电技术国际研讨会[C]. 北京, 中国: [出版者不详], 2005. 9-13.
- OKAMOTO H. The design of 1000 kV AC transmission engineering system in Tokyo electra power system[A]. **International Workshop on UHVAC Transmission Technology** [C]. Beijing, China: [s.n.], 2005. 9-13.
- [17] 林集明, 班连庚, 王晓刚. 中国特高压系统电磁暂态问题研讨[A]. 特高压输电技术国际研讨会[C]. 北京, 中国: [出版者不详], 2005. 14-21.
- LIN Ji-ming, BAN Lian-geng, WANG Xiao-gang. The discussion of the electromagnetic transient problems of China UHV power system[A]. **International Workshop on UHVAC Transmission Technology** [C]. Beijing, China: [s.n.], 2005. 14-21.
- [18] YAMAGATA Y, NAKADA Y, NOJIMA K, et al. Very fast transients in 1000 kV gas insulated switchgear[A]. **Transmission and Distribution Conference 1999** [C]. [s.l.]: IEEE, 1999. 501-508.
- [19] 李培国. 国外对特高压输电线路雷击跳闸原因的一个新观点[J]. 电网技术, 2000, 24(7):63-65.
- LI Pei-guo. A new viewpoint about lightning trip-out of UHV transmission lines[J]. **Power System Technology**, 2000, 24(7):63-65.
- [20] 常美生. 特高压输电线路的防雷性能分析[J]. 电力学报, 1997, 12(2):28-31.
- CHANG Mei-sheng. Analysis of the lightning protection for ultra-high voltage transmission line[J]. **Journal of Electric Power**, 1997, 12(2):28-31.
- [21] KIM Jeong-boo, SHIM Eung-bo, SHIM Jeong-woon. Design on the KEPCO 765 kV double circuit transmission system[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 2000, 15(2):381-386.
- [22] HAMED M, ESMAIL D. Statistical study for switching processes in compensated UHV transmission systems [J]. **IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.**, 1997, 144(3):237-241.
- [23] 董新洲, 苏 斌, 薄志谦, 等. 特高压输电线路继电保护特殊问题的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22):19-22.
- DONG Xin-zhou, SU Bin, BO Zhi-qian, et al. The study of special problems on protective relaying of UHV transmission line[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2004, 28(22):19-22.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

孙才新(1944-), 男, 四川垫江人, 教授, 中国工程院院士, 长期从事高电压与绝缘技术的研究;

司马文霞(1965-), 女, 湖南汨罗人, 教授, 长期从事复杂大气环境下电气外绝缘技术及电力系统过电压的研究。

Overvoltage in UHV transmission system

SUN Cai-xin¹, SIMA Wen-xia¹, ZHAO Jie², RAO Hong², ZHANG Mi²

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510620, China)

Abstract: The status in quo of foreign UHV(Ultra High Voltage) system development is introduced and the overvoltage problem is emphasized. The inner overvoltage, such as power transient overvoltage, secondary arc current and switching overvoltage, are analyzed and countermeasures to limit the inner voltage are given. For lightning overvoltage, the back-flashover lightning protection performance, the shielding-failure protection performance and the design of shielding protection of UHV system are discussed. The calculation methods of back-flashover lightning protection level and shielding-failure protection level are summarized.

Key words: UHV; transmission system; overvoltage