

国际大电网会议论文选译

过电压和绝缘配合

1972

水利电力部科学技术情报室

国际大电网会议论文选译

(1972)

过电压和絕緣配合

水利电力部科学技术情报室



前 言

1972年国际大电网会议第33专业小组(过电压和绝缘配合)共有15篇论文和一份专业报告。我们选译了其中10篇。15篇论文讨论的问题大致可分四个方面:有关操作过电压方面的有4篇(33-01、33-05、33-06、33-07);暂态过电压和避雷器方面的有4篇(33-04、33-08、33-12、33-14);污秽绝缘子方面的有5篇(33-02、33-03、33-09、33-10、33-13);外绝缘介电强度方面的有2篇(33-11、33-15)。

在变电所安装自动记录装置(过电压计数器等),长年在运行中记录过电压,可以得到过电压累积频次分布,以便用统计方法处理操作过电压的问题。论文(33-01)报导了一种半导体计数器,并提供了52年来记录的结果。经过改进的过电压记录仪不仅能识别过电压的幅值,而且能识别持续时间和波形,但是仍不能区分各种操作类型引起的过电压。

由于采取了降低操作过电压的措施,操作过电压倍数能限制在1.5到1.8的范围内。论文(33-05)指出:断路器装合闸电阻和分闸电阻可有效地限制合闸和重合闸过电压。论文(33-07)提出用自动装置切合电抗器对限制过电压和系统经济运行有好处。操作过电压等值波形问题仍未定论。

随电压等级不断提高,绝缘水平逐渐降低。论文(33-08)报导了美国降低绝缘水平的情况。由于有效地降低了操作过电压,暂态过电压的问题越来越突出。论文(33-12)讨论了超高压和特高压系统中的暂态过电压、它们的分类、起因、发生的或然率、幅值、持续时间以及限制方法。论文(33-04)讨论了避雷器在暂态过电压下的动作状况,并和操作过电压下的动作状况进行了比较。提到了一种新型的可控间隙避雷器,可提供更低的保护水平,提高灭弧能力;还讨论了多柱并联避雷器运行的特点。

关于避雷器应用原则问题仍存在两种意见分歧:“第一道防线”的观点和“第二道防线”的观点。大多数意见倾向于“第二道防线”。论文(33-08)讨论了按“第一道防线”观点进行绝缘配合的特点。提到避雷器特性应采用统计定义、用统计方法考虑绝缘配合、修改避雷器试验程序等问题。论文(33-14)讨论直流高压避雷器。

为了研究污秽绝缘子特性,进行了人工污秽试验和现场试验。关于人工污秽试验不可能得出一个通用的试验方法。论文(33-09)建议对于两大类污秽应分别采用两种试验方法:工业地区污秽采用固体层人工污秽试验;沿海地区盐污应采用盐雾试验。论文还分析了固体层试验的有效性和复现性。论文(33-10)讨论了绝缘子性能和爬距的关系。同样条件下,爬距仅差20%就关系到绝缘子能否应用。在污秽区建立加压和不加压现场试验站可测定各地的污秽程度、长期检验各种型式的绝缘子。论文(33-02)研究了操作过电压作用下污秽绝缘子的特性。得出500千伏以上系统,工频电压是造成污闪的决定因素。关于防污闪的保护措施提到了带电冲洗、涂油脂、涂半导体釉以及采用特殊剖面的聚合物绝缘子。

关于外绝缘介电强度方面,提到了试验波形的影响、“间隙系数”的采用和大气条件

修正系数等问题。论文(33-11)主张:在进行相间间隙试验时应采用两个幅值相等、极性相反的冲击波。提出了各电压等级下空气间隙数值的建议。论文(33-15)研究了长间隙(5~10米)放电的物理过程,测量了击穿电压、击穿时间、电晕起始电压、空间电荷。
《雷纳第》放电物理小组仍在继续这方面的研究工作。

为便于有关同志了解本组各篇论文的情况,对没有翻译的几篇论文,我们译出了摘要和(33-00)附件——小组讨论纪要,列在附录中供参考。



目 录

空载线合闸时的操作过电压 (33-05)	(1)
苏联750千伏电网中的操作过电压及其保护系统 (33-07)	(11)
暂态过电压及其对超高压和特高压避雷器提出的保护要求 (33-04)	(19)
避雷器用于绝缘配合的新概念 (33-08)	(33)
超高压和特高压系统中的暂态过电压 (33-12)	(45)
在污秽状况下绝缘子的操作冲击特性 (33-02)	(59)
对固体层人工污秽试验的评价 (33-09)	(68)
盐污秽绝缘子性能的经验 and 研究 (33-10)	(78)
在超高压变电所中操作过电压所要求的相间空气间距 (33-11)	(91)
在操作冲击波作用下长间隙的击穿现象 (33-15)	(104)
第33专业小组 (过电压和绝缘配合) 讨论纪要 (33-00) 附件	(115)
捷克电力系统中过电压统计研究结果 (提要) (33-01)	(119)
沙漠地区污秽绝缘子的比较试验 (提要) (33-03)	(120)
500千伏无补偿线路上的操作过电压 (提要) (33-06)	(121)
污秽地区线路绝缘子的现场研究 (提要) (33-13)	(122)
直流高压避雷器及其对直流高压系统过电压保护的应用 (提要) (33-14)	(123)



空载线合闸时的操作过电压

(33-05) *

提 要

本报告概述在 400 千伏系统中暂态分析仪上进行空载线合闸和重合闸研究所得到的结果。

报告讨论以下几个问题：

1. 操作线路送端系统的容量和结构对过电压的影响。

如果线路的送端是一个系统，则最大统计合闸过电压通常为 1.9~2.3 倍。

过电压波形变化太大，不能作类似的简单结论。

2. 故障排除后，重合闸起始条件的分析。

故障类型和系统条件不同，线路上残余电荷状况也不同，所以重合闸起始条件差别很大。

文中分析了这些条件并考察了它们对产生重合闸过电压的影响。

3. 合闸电阻的投入。

采用标准阻值和投入时间一定的单级合闸电阻，就可以把空载线的重合闸过电压倍数降低到 2.0。

上述结论适用于 400 千伏和 500 千伏系统。根据这些结论，能够考虑减少系统建设投资问题。

1. 引 言

在研究绝缘配合问题时，应着重研究各种参数对操作过电压、特别是对合闸和重合闸过电压的影响。在 1970 年国际大电网会议第 13 专业小组报告[1]中列有这些参数的一览表。

由于这些参数多种多样，所以选择绝缘水平很困难。如果能确定它们之间的相对重要性及变化范围，就可能克服这些困难。

本文只限于研究三个重要参数：

—系统结构（包括接线方式、容量）；

—重合闸条件（故障类型、无电流间歇时间、单相或三相重合闸）；

—合闸电阻的投入。

* 作者 C. DUBANTON 和 G. GERVAIS，法国电力公司。

根据法国 400 千伏系统上和法国电力公司的暂态分析仪上所得到的大量试验结果，综合研究了上述参数的影响。这些结果，可与其他作者在 400 千伏和 500 千伏系统上得到的相核对。

从大量试验结果可得出具有普遍性的结论，以便节省系统建设投资。

2. 送端系统对过电压的影响

在影响合闸过电压的系统参数中，线路送端系统的结构是重要参数之一。

系统结构的特征，可用系统拓补法（联网法）和各母线的短路功率来表示。

为了证明系统结构的影响，首先应用了高压系统上的试验结果；然后补充以模拟试验的结果。以前已经证明这种方法是合理的[2]。

2-1 在法国 400 千伏系统上的研究

进行高压试验的系统接线如图 1 所示，这是法国 400 千伏系统的一部分。

这些试验分几个系列，把 400 千伏、237 公里的空载线合到不同结构的送端系统上。整个合闸试验期间，系统结构只改变一部分。上述系统事实上包括 A 和 B 两个分系统，由一个系列合闸试验到另一个时，分系统 A 的结构保持不变，只改变分系统 B 的结构。

分系统 A 可用三个基本系统 R_1 、 R_2 和 R_3 来表示，每一个都可以看成是恒定的地区性的三相短路功率源。 R_1 (12.8×10^3 兆伏安) 用两条 79 公里线路联于 R_2 (12.5×10^3 兆伏安)，而 R_3 (6.8×10^3 兆伏安) 用一条 180 公里线路联于 R_1 ，用一条 155 公里线路联于 R_2 。

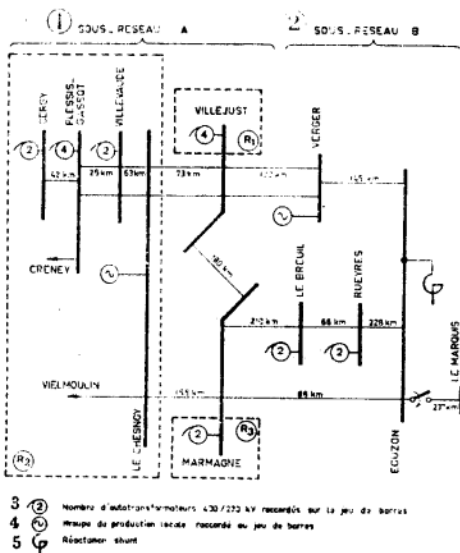


图 1 400 千伏试验网络布线图

1—分系统 A；2—分系统 B；3—母线上联接的 400/220 千伏变压器台数；4—母线上联接的地区发电机组；5—并联电抗器

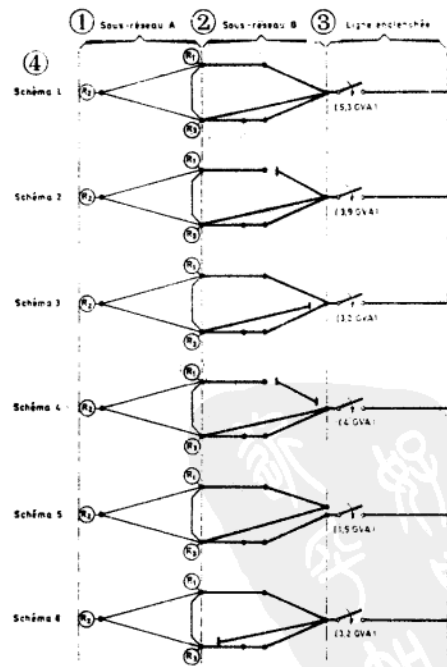


图 2 试验时系统的不同接线方式
1—分系统 A；2—分系统 B；3—合闸线路；4—接线方式

分系统 B 通过 R_1 和 R_3 联到进行操作的母线上。它由六条线路和三个中间变电所组成，这些线路和变电所能联成图 2 所示的六种接线方式。各种接线方式在操作母线上的短路功率不同，其数值见图 2。

对于这六种接线的每一种，至少进行 20 次三相合闸操作；这 20 次操作的合闸瞬间是可控的，它们有规律的分布在一个周波内，这样得到的过电压分布比任意取 20 个“合闸瞬间”所得到的更有意义。因为任意取 20 个“合闸瞬间”不能保证和运行人员进行大量合闸操作时所得的“合闸瞬间”，具有相同的或然率。

在 237 公里长线路的送端、开路末端以及在分系统 B 内的两点进行测量。这里只研究线路开路末端所记录的过电压。

表 1 列出了所记录过电压倍数*的最大值和最大统计值（超过这个数值的或然率为 1.4%），即 $m+3\sigma$ ， m 和 σ^2 分别为统计分布的一次矩和二次矩。

系统结构不同，所得的过电压波形差别很大。

表 1

图 2 中接线的编号	1	2	3	4	5	6
最大观测过电压	2.05	2.00	1.85	2.00	1.85	1.95
最大统计过电压 **	2.23	2.06	2.06	2.20	1.94	2.01

2-2 暂态分析仪上的研究

在暂态分析仪上模拟上述试验，对于各种系统结构所得到的试验结果都和系统试验相符合[2]。在暂态分析仪上总共进行了四、五百次三相合闸操作，进一步证实了表 1 中所列由系统试验推论出来的最大统计值。

在分析仪上还模拟了 400 千伏系统的其它结构形式，它们和图 2 所示的结构类型相同，这里不再叙述；这些试验得出的过电压倍数和表 1 中的数值数量级相同。

—最大观测过电压在 1.8 和 2.15 之间；

—最大统计过电压在 1.99 和 2.25 之间。

模拟得到的过电压波形变化情况与系统试验结果相同。

2-3 国外系统上的一些研究结果

在国外系统上的试验结果证明了表 1 数值的正确性。

例如，根据 1967 年英国 400 千伏联合系统上进行的试验[3]，最大过电压倍数低于 2，只有一个特殊情况过电压达到了 2.25 倍。

在苏联“MIR”系统 1965/66 年进行的试验[4]和波兰 400 千伏系统上的试验[5]，最大过电压倍数也未超过 2.25 和 1.95。

2-4 上述结果的综合

就过电压倍数和波形讨论如下：

* 过电压倍数是过电压峰值和操作后测量点上相电压之比。

** 最大统计过电压随母线短路功率的增大稍有增加；但不是所有系统都适用这个规律。

2-4-1 过电压水平 首先应该注意到：实际的最高过电压低于一般估计和由暂态分析仪、数字模拟所得到的数值。这是由于在模拟研究中所模拟的系统状况和实际系统的状况有出入。在系统试验中不考虑“地区电源”馈接单根线，而在模拟研究中大多是研究这样的情况。在这样的情况下，某些低频振荡（如线路的自然频率）同电源阻抗和线路电容之间的振荡发生共振，使幅值增加。

在这种情况下，电源等值阻抗的模拟是很关键的，特别是对于阻尼和饱和现象，模拟试验会得到较高的数值，问题可能就在于此。附录中讨论了在很简单的接线情况下，电源的模拟元件对最大值的影响。

第二，必须注意到：送端系统的参数在很大范围内变化时（如操作母线短路功率变化了3.5倍，并且系统结构也变化很大时），最高过电压数值变化很小（ $\pm 10\%$ ）。

下面分析一下所有这些系统的共同点：

1. 送端系统不是由“地区性电源”（发电机-变压器组）构成，而是由多条线路组成；

2. 这些线路形成网络，并同操作母线相联；

3. 这些线路把地区电源的大部分功率输送给母线（所研究的法国系统，几乎是全部功率）。

所以得出结论：如果线路送端是一个系统，即使没有合闸电阻，最大统计合闸过电压倍数也很少超过2.3倍。

2-4-2 波形 对于过电压倍数，可以通过分析得出简单明了的结论，而对于波形就不能做到这一点。波形和以下几个因素有很大关系：

1. 断路器触头闭合的次序；

2. 操作线路的长度；

3. 送端系统的结构，特别是操作母线上的线路的长度和数目。

前两个因素对波形的影响是明显的，当采用一个“等值的地区性电源”时，往往忽略了第三个因素的影响。尽管在某些情况下所得到的过电压最大幅值相同，但这种简化用来研究波形就不行。“等值地区性电源”使波形过于简化，减小了起始波的陡度和叠加脉冲的陡度，并减少了反射波的数目。

3. 起始重合闸条件的分析

以上已经指出了送端电网的结构对合闸过电压的影响，现在讨论重合闸条件的影响。操作过电压的最大统计值是决定绝缘配合的根据之一，带残余电荷的空载线重合闸时，往往会产生最大的操作过电压。这样的重合闸操作通常是在故障排除后自动进行。

除了以上研究过的各种参数之外，重合闸时线路各相上残余电压的大小也会影响过电压的数值[6]。因此，现在来研究一下合闸前线路上的残余电压是怎样引起的。

在暂态分析仪上进行试验，重合一个末端开路的线路，把不同条件下产生的过电压进行比较。在重合图3所示的末端开路（没有放电元件）的线路时，线路上的残余电荷基本上可看成是不变的；但是如果接有电抗器，则情况就不同，在合闸前瞬间残余电压以接近于工频的频率振荡。

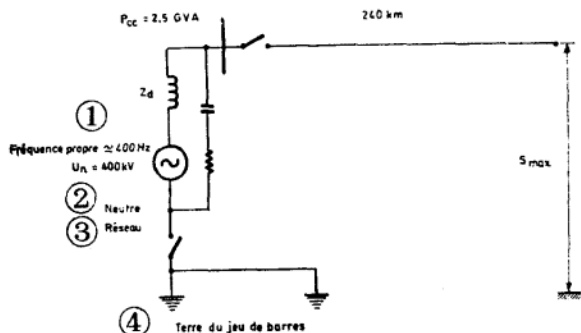


图 3 进行重合闸分析的系统接线图

1—自然频率；2—中性点；3—系统；4—母线接地；

模拟特性：24 个 π 型元件组成的三相线路。

$L_d = 1.05$ 毫亨/千米， $R_d = 30$ 毫欧/千米， $C_d = 11.5$ 毫微法/千米。

$L_0 = 3.2$ 毫亨/千米， $R_0 = 280$ 毫欧/千米， $C_0 = 7$ 毫微法/千米

3-1 切断无故障线路后的重合闸

在没有故障的情况下，线路跳闸大多是有计划的使线路退出运行，这就不存在重合闸问题；只有当保护系统误动作和操作错误时，会发生线路重合闸。

断路器试验和其它特殊试验时进行的操作，并不看成是正常操作。因此，切断无故障空载线后的重合闸，发生的或然率很小。

如果仍要考虑这种情况，并假定放电很慢（气候干燥，没有电压互感器等等），那么在三相上的残余电荷都维持较高的数值（令其为 1 标么值）。但是，现代断路器大都装有分闸电阻，线路电容通过这个电阻向送端系统的阻抗放掉了部分电荷。于是，残余电荷大大衰减，衰减速度是分闸电阻值、电阻投入时间及系统阻抗的函数。例如，用 10 千欧电阻投入 20 毫秒，残余电荷减少 50%。

以上事实表明：尽管很多模拟研究的基础是假定三相上的残余电荷都接近于 1 标么值，但这种假定是不真实的。由此所得的过电压倍数过高，没有必要根据它来确定绝缘水平。

3-2 故障排除后空载线的重合闸

线路上发生的故障可能是单相的，也可能是多相的。合闸操作可能是：

一单相故障。单相切除接着进行单相重合，或三相切除，三相重合；

一多相故障。三相切除，三相重合。

下面分别考虑以上各种情况下，重合闸前瞬间，线路每一相上残余电压的情况。

3-2-1 单相故障、单相切除，单相重合 两个非故障相处于合闸状态，保持系统电压。在这两相上可能发生的过电压是工频过电压，并且是系统零序阻抗（接地系数）的函数。

故障相的故障电阻足够低，至多几百欧，所以线路打开后，这相的电容立即完全放电。例如：对 200 公里中等长度的线路，假定故障电阻为 500 欧、一相的电容约为 2 微法，则放电时间常数只有 1 毫秒。

因此，单相重合闸的起始条件如下：

—故障相的电荷为零；

—另外两相的电压为运行电压。

在图 3 所示线路上试验所得的最大过电压倍数列于表 2：

表 2

条 件		最 大 过 电 压	
中 性 点	分闸电阻值 — 投入时间	合闸电阻值 — 投入时间	在末端的倍数 $(m+\beta\sigma)^1$
絕 緣 ²	无	无	2.12
絕 緣 ²	10千欧—20毫秒	无	2.12
接 地 ³	10千欧—20毫秒	无	2.28 ⁴⁾
接 地 ³	10千欧—20毫秒	470欧—10毫秒	1.69 ⁴

注：(1)經500次任意合閘得到的过电压或然率分布(触头动作分散时间1.5毫秒)。

(2)因为故障相残余电荷是零，所以这两种情况相同。

(3)送端系统的中性点联接到变电所的接地线上；因此，假定 $X_0 = X_d$ ，也就是，按国际电工协会规定的接地系数为58%。

(4)这两个数值属于故障相，因为两个非故障相过电压不严重。

由表中可以看出，在所研究的情况下，中性点接地系统中的过电压不低于相同条件下的中性点绝缘系统中的过电压。

应用合闸电阻有明显的好处。

3-2-2 单相故障，三相切除，三相重合 和上述情况一样，故障相完全放电。

另外，两个非故障相在电压峰值时打开，线路充电到某一电压值，这个残余电压的大小取决于是否应用分闸电阻，并取决于系统的零序阻抗。在没有分闸电阻时，对于直接接地系统，这两相上的残余电荷可能超过1.5标么值。

三相重合闸的起始条件是：

—故障相上的电荷为零；

—另外两相上残余电荷具有较高的数值，并与系统状况有关。

在图 3 线路上试验得到的最大过电压倍数列于表 3。

表 3

条 件		最 大 过 电 压	
中 性 点	分闸电阻值 — 投入时间	合闸电阻值 — 投入时间	在末端的倍数
絕 緣	无	无	4.70
絕 緣	10千欧—20毫秒	无	3.87
接 地	10千欧—20毫秒	无	2.89
接 地	10千欧—20毫秒	470欧—10毫秒	1.75

由表中看出，如果断路器上不装合闸电阻，三相重合闸产生的过电压很高。

3-2-3 多相故障，三相切除，三相重合 多相故障情况下，重合 闸时各相上的残余

电荷取决于：

—故障的性质：两相还是三相，接地还是不接地；

—系统的零序阻抗：中性点是否接地；

—断路器触头打开的次序和分闸电阻投入的次序。

于是，各相上的残余电荷数值变化范围很大，由 0 到大于 1 标么值。

应当指出，最大电荷往往出现在中性点绝缘的系统中和多相不接地故障情况下，而这种情况是少见的。

分析所有可能的情况太烦琐了，所以这里仅考虑最严重的情况之一：中性点接地系统发生两相不接地故障。

在最不利的情况下（没有分闸电阻），各相上的残余电荷分别为 +1.4 标么值、+1 标么值和 +1 标么值。没有投入合闸电阻时，这种情况下重合闸产生的最大过电压数值为 3.87 倍。采用分闸、合闸电阻，则最大过电压数值为 1.80 倍。

以上考虑的四种多相故障（两相、三相、接地、不接地）仅占线路故障的 15% 左右（85% 是单相故障）。因此，用统计方法确定绝缘配合、估计事故率时，这些最严重的故障所占比重较小。

3-3 具有并联电抗器线路的重合闸

以上分析了重合闸的起始条件，并用近乎恒定的残余电荷数值来表示。在具有并联电抗器的线路上，情况就不同，跳闸时产生的振荡在重合闸瞬间仅略微有所衰减。在重合闸瞬间线路上的电压是振荡的，可能接近于 1 标么值，与线路的结构、长度、补偿度等有关。

这种情况下的最大重合闸过电压和残余电荷恒定时的最大过电压差不多。

3-4 送端系统对重合闸过电压的影响

由于送端系统的运行条件和设备情况是多种多样的，所以最大过电压变化范围很大，对于这样的系统，虽然有办法得出唯一的最大合闸过电压，却不可能用同样的方法得出单一的最大重合闸过电压。

如果想要得到重合闸过电压倍数的最大值，以便用来确定绝缘配合，就必须预先确定运行条件，即：

—系统实际的零序阻抗；

—分闸电阻的数值和它们的投入时间；

—预定的重合方式（单相还是三相，无电流间歇时间）。

分析和比较表 2 和表 3，可以说明断路器的分闸、合闸电阻对重合闸过电压的影响。和系统设备总价比较，分闸、合闸电阻所增加的费用很少，所以在系统中应用分闸和合闸电阻能显著地节约投资。

4. 用标准合闸电阻来减低过电压

用以下两种传统方法可以降低合闸过电压：

—触头同步动作；

—投入电阻。

触头同步的重要性另有报告[7]说明，以下只限于讨论有关投入单级电阻的几个问题。

4-1 电阻数值的选择及其投入时间

很多研究（大都是模拟研究[8.9.10]）指出：合闸电阻及其投入时间的选择与系统结构有关（系统的布局、短路容量、线路长度、补偿等等）。对应每一个系统结构都有一个最佳投入参数（电阻数值和投入时间）。研究得出：这些数值不是关键性的，它们改变相当大时，最大过电压数值只略微有些变化。

并且，对于各种断路器使用条件都考虑一个最佳投入参数，是不可能的，因为送端系统和母线的结构随输送功率而变化（接线方式、特别是母线上的短路功率）。

综上所述，看来有必要选择适用于各种情况的标准投入参数。例如，这里提到的暂态分析试验，选用了470欧的电阻、投入时间10毫秒、分散性0.5毫秒。

4-2 过电压降低系数

在决定是否需要分级投入几个电阻之前，必须知道没有任何投入电阻时的最大过电压倍数 k_s 。

用 k_a 表示有投入电阻时的最大过电压倍数，则过电压降低系数的定义为 $r = \frac{k_s - k_a}{k_s}$ 。

k_s 和 k_a 应在同一运行条件下确定。

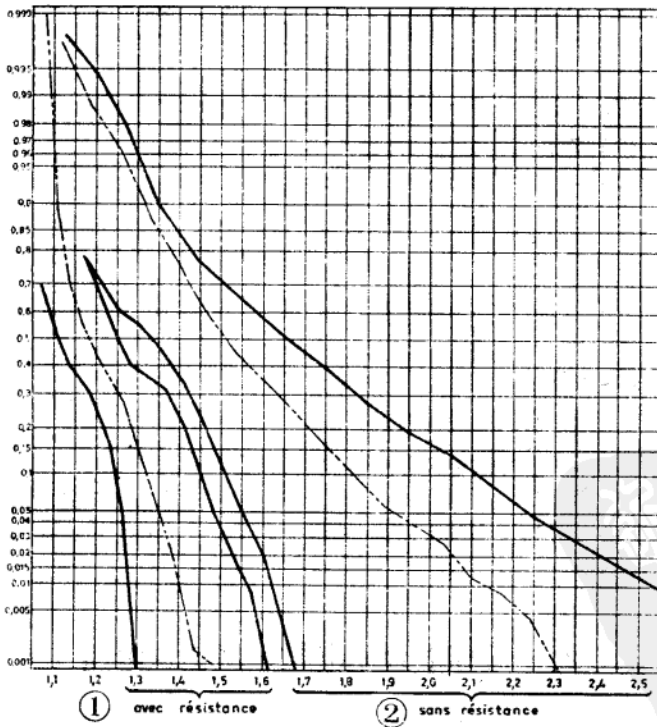


图 4 16种送端系统，有和没有合闸电阻时的过电压频次分布包络线
1—有电阻；2—无电阻

在16种系统结构上进行了暂态分析试验。每一种都分别做了500次有合闸电阻和无电阻的三相合闸操作，以确定过电压分布（即在线路末端总共测量 2×24000 次）。

利用所得到的合闸过电压频次分布，可以计算出各种结构的系统应用标准单级电阻时的过电压降低系数。

降低系数数值变化于25%~60%之间（平均值为35%），如果系统结构产生的最大过电压数值最高，则其降低系数数值就最大。

图4表示16种送端系统的过电压频次分布的包络线（有和没有合闸电阻），同时还示出了一个具体例子（点画线所示）。根据这个图，能够估计投入标准合闸电阻或不投入时的合闸过电压上下限。

上述结果和其它研究得到的数值[8.9.10]差不多。由于数值相近的结果相当多，所以至少对400千伏和500千伏系统可以概括出如下结论：不管系统结构怎样，利用单级标准合闸电阻都会减低最大过电压，其降低系数至少是25%。

用单级电阻时，仅有极个别的最大合闸过电压超过2.0倍，最大重合闸过电压超过2.8倍的也极少。

因此，400千伏和500千伏系统，没有必要采用两级电阻。

5. 结 论

1. 只要线路的送端是一个系统，那么不采取任何减低过电压的措施，最大统计合闸过电压通常也不会超过2.3标么值。要确定典型的过电压波形实际上是不可能的。

2. 重合方式不同，最大过电压变化很大。但是，可以指出：

a. 在最常见的单相故障情况下，单相重合闸比三相重合闸有利。

b. 在多相故障的情况下，断路器上装分闸和合闸电阻可限制三相重合闸过电压。

c. 对于中性点接地系统，考虑到分闸电阻引起的放电作用，没有合闸电阻时，最大统计重合闸过电压通常不超过3.3倍；有合闸电阻时，不超过2.3倍。

3. 利用单级标准合闸电阻（470欧、投入10毫秒），最大统计过电压倍数至少降低25%。

参 考 资 料

- [1] BALTENSBERGER P., RUOSS E. - Switching overvoltages in EHV and UHV networks (CIGRE 1970, Report No. 13-14).
- [2] DUBANTON C., GERVAIS G. - Validation des méthodes analogiques ou numériques de prédétermination des surtensions d'enclenchement par des essais en réseau H.T. (Revue Générale de l'Electricité - January 1972).
- [3] BATTISSON M.J. et al. - British investigations on the switching of long EHV transmission lines (CIGRE 1970, Report No. 13-02).
- [4] BELJAKOV N.N. et al. - Issledovanie perenaprjazhenij v puskovyh ispytaniyah na elektroperedace 400 kV "MIR" (Elektricitstvo, december 1968, p.1).

- [5] JACZEWSKI M., KMIEC A., KUMANOWSKI M. - Overvoltages measured in the Polish 400 kV system during no load switching (CIGRE 1966, Report No. 402).
- [6] CLERICI A., TASCHINI A. - Overvoltages Due to Line Energization and Reenergization Versus Overvoltages Caused by Faults and Fault Clearing in EHV Systems, (I.E.E.E. Transactions on P.A.S. - May-June 1970 - Vol. 89 No.5/6, p.932).
- [7] MAURY E. - Synchronous closing of 525 and 765 kV circuit-breakers : a means of reducing switching surges on unloaded lines, (CIGRE 1966, Report No.143).
- [8] HEDMAN D.E., JOHNSON I.B., TITUS C.H., WILSON D.D. - Switching of Extra-High Voltage Circuits, II - Surge Reduction with Circuit-Breaker Resistors, (I.E.E.E. Transactions on P.A.S. - December 1964 - Vol. 83 No 12, p.1196).
- [9] SABATH J., SMITH H.M., JOHNSON R.C. - Analog Computer Study of Switching Surge Transients for a 500 kV System (I.E.E.E. Transactions on P.A.S. - January 1966 - Vol.85 No.1, p.1).
- [10] FUKUDA S. et al. - Switching surge reduction with circuit-breaker resistor in extra highvoltage systems (CIGRE 1970, Report No.13-04).

附 录

电源模拟元件对最大过电压的影响举例

带残余电荷的 240 公里线路，在无故障拉闸后接着进行重合闸，线路送端系统的短路容量为 2.5×10^3 兆伏安，电压为 400 千伏。

为了举例，送端系统用两个不同的模拟元件：方案 A 和 B，简化成“地区电源”。

方案 A 只表示短路电感，没有考虑“电源”的自然频率和阻尼。

方案 B 有一个 R-C 回路与上述短路电感并联模拟“电源”的自然频率和阻尼。虽然方案 B 不及全面模拟送端系统那样准确，但比之方案 A 要切实些。

在线路末端测得的最大过电压：

方案 A 为 4.05 倍；

方案 B 为 3.5 倍。

所得数值有显著差别（大约 15%）。通过在系统中进行的试验说明：方案 A 决不能表示一个复杂的网络。

并且，在模拟中通常使用的电感没有考虑在额定电压下的饱和效应和精确的频率响应，这也是用“地区电源”（发电机-变压器单元）模拟不准确的原因。

苏联750千伏电网中的操作过电压及其保护系统

(33-07) *

提 要

本文简单介绍苏联750千伏输电线,叙述了线路上可能产生的各种操作过电压、线路选用的绝缘水平、过电压保护系统以及避雷器的动作情况。

750千伏输电线及其绝缘水平

苏联动力工业的发展和输电容量的增长,需在330千伏网络之上建立750千伏的电压等级,同时作为和现有500千伏网络的联络线。建设中的典型750千伏线路如图1所示。在运行的起始阶段,电抗器可不切除;以后,输送最大负载时,就需要把电抗器切除。为此,将采用专门的操作设备;它兼有一个负荷开关和一个在电压升到 $1.2 \sim 1.4V_{\text{н}}$ 时用以建立无惯性火花联接的装置[1] ($V_{\text{н}} = \frac{787\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 642$ 千伏,是750千伏网络的最大运行相电压的峰值)。

750千伏网络中的操作过电压限制在 $2.1V_{\text{н}}$,自耦变压器内绝缘上的运行电场强度比现有330~500千伏设计值要稍高一些。绝缘的运行可靠性需在运行期间考核;然后才允许进一步增加电场强度。事实上,要增加运行电场强度,必须同时减低雷电冲击水平。

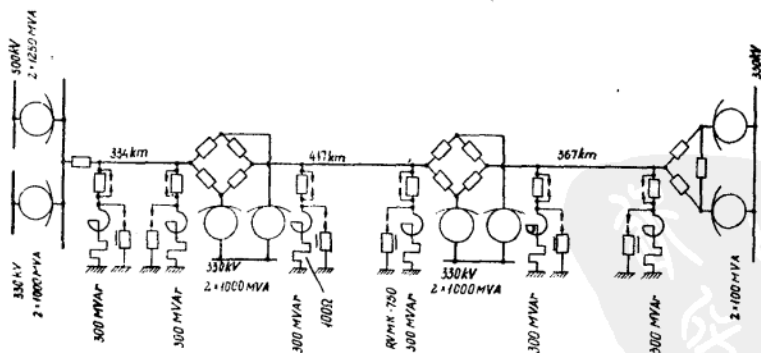


图1 750千伏输电线接线图
(图中未繪RVM-750型变电所避雷器)

- 作者A.A. AKOPYAN, V.V. BOURGSDORF, K. I. KUZMITCHEVA, Yu. I. LYSKOV, V. S. RASHKES和V. P. FOTIN(苏联)。

外绝缘主要由运行电压决定，相间距离大小则和无线电干扰限度有关。因此，现阶段没有必要进一步降低操作过电压。同时，具有 $2.1V_m$ 水平的断路器和避雷器比原来的结构更简单、价格更便宜，而且某些类型的过电压对绝缘并不危险。

雷击时避雷器上的残压应不超过1500千伏。由于变电所进口安装了绝缘配合间隙，侵入变电所的雷击过电压幅值限制在2500千伏。

在750千伏科纳克沃-莫斯科工业性试验线路上校核了750千伏设备所选用的绝缘水平[2]。750千伏电网所采用的试验电压见表1。

750 千伏电力设备的试验电压 表 1

設 备 和 絕 緣 类 型	試 驗 电 压	
	50赫, 千伏有效 一分钟/平滑升压	冲击, 千伏最大 全波/截波
A. 干試驗		
1. 电力变压器	900/1050	2175/2300*
2. 自耦变压器	800/1050	2175/2300*
3. 并联电抗器	900/1050	2300/2500**
4. 仪器设备、电流互感器、电容互感器、絕緣子	950/1050	2100/2600
5. 断路器触头間(打开)	- /1770	2700/-
6. 隔离开关触头間(打开)	- /1500	- /-
7. 相間	- /1770	- /-
B. 湿試驗		
1. 所有类型设备	- /900	- /-
2. 断路器触头間(打开)	- /1500	- /-

• 外絕緣为1900/2350;
• • 外絕緣为2100/2600。

看来，除50赫平滑升压的外绝缘试验之外，以后将提出操作过电压冲击试验规则；并考虑用操作冲击试验和50赫 $1.3V_m$ 长时间电压试验来代替内绝缘一分钟试验。

750千伏变电所采用的空气间隙如下：

“相”对“地”，5.5米；相间，8.0米。

750千伏线路的绝缘子串是根据运行电压选择的，其泄漏比距为1.5厘米/千伏。绝缘子串长度是7.5~8米，耐操作过电压强度高 $于2.5V_m$ 。按照运行电压考虑，导线和杆塔间的绝缘距离是1.6米，根据操作过电压，是4.5米；“相”对“地”的最小间隙是10米；相间距离是19.5米。

750千伏网络的操作过电压

动态过电压的发生是由于线路一端加压或去掉电压，并且在非对称故障时过电压会显著升高。过电压大小取决于线路长度、邻近系统的等值电抗和等值电动势。

750千伏线路段的长度是300~450公里。在750千伏网络运行的第一阶段等值电抗是80~120欧，以后是40~80欧。接受功率时，等值电动势是 $0.85\sim 1.0V_m$ ；发送功率时，是 $0.9\sim 1.07V_m$ 。由于电厂离750千伏母线远，自动励磁调节器和强行励磁设备使电动势增加不超过3~5%。因为线路结构特性是相同的，所以过电压数值的不同主要决定于有无