

国际大电网会议论文选译

开关设备

1972

水利电力部科学技术情报室

前 言

本届会议第13专业小组(开关设备)共提出论文11篇,所涉及的问题大致可分四个方面:电网的短路容量和暂态恢复电压(13-01、13-03、13-06、13-11);超高压和特高压电网中的操作过电压(13-02、13-03);电流过零现象和合成试验(13-01、13-05、13-06、13-09、13-10);断路器的可靠性(13-04、13-07、13-08、13-09)。我们选译了其中7篇。

关于短路容量和暂态恢复电压方面的主要问题,已基本解决。但由于电力系统的不断扩大,输电电压不断提高,对某些特殊问题还需进一步研究。例如,随短路电流不断增大,有必要深入了解暂态恢复电压的起始部分。意大利的一篇论文研究了断路器端部故障和近区故障时的起始暂态恢复电压,指出当开断电流达40~50千安时,起始暂态恢复电压(0~5微秒)对断流容量有显著影响。起始暂态恢复电压的波形与断路器附近设备和线路的参数有关,变电所某些设备(电流互感器、电压互感器、隔离开关等)的电容会使暂态恢复电压全波产生时延效应。

对于超高压和特高压系统来说,国际电工委员会所推荐的暂态恢复电压不能完全满足要求。

关于超高压和特高压系统中的操作过电压,主要仍然是空载线路或带终端变压器线路的合闸过电压。另外,对切断并联电抗器和带电抗器的变压器时的暂态过程也进行了一些研究。目前除进行现场测量外,广泛采用数字计算机来分析暂态过程,同时仍继续采用暂态网络分析仪。英国的一篇论文介绍了这些技术在英国中央发电局系统上的应用,数字计算结果和三相暂态网络分析结果都同现场试验结果相符。

电流过零附近的电弧特性对断路器成功灭弧起决定作用。但是,目前对过零前后100微秒到200微秒这段电弧熄灭期间的现象了解得还很不够,尤其是过零附近几微秒的现象更有待进一步研究。芬兰一篇论文讨论了少油断路器电流过零现象的测量结果,指出油的喷射可以消除弧后电流,可以提高容许的恢复电压上升率。法国的一篇论文介绍了气吹断路器灭弧室的最大热动力极限问题,提出了计算热动力极限的电弧模型,并用空气和六氟化硫断路器的试验结果作了验证。指出过大的短路电流会使电弧塞满喷嘴,吹弧作用受到阻碍,影响断路器灭弧能力。但在讨论中提出相反意见,认为上述现象可使电弧等离子体起阀门作用,避免在电流过零前的关键时刻吹弧,使电弧能量降低,改进灭弧性能。

关于断路器和试验回路的相互作用问题,捷克一篇论文指出,试验回路的寄生参数会影响试验结果,但这种相互作用主要是在开断失败或燃率较高的范围内。这就需要规定试验回路的详细接线,特别是断路器附近的接线。在断流容量具有足够裕度的情况下,试验结果主要由断路器本身确定。苏联一篇论文谈到,除了需要规定暂态恢复电压的参数之外,建议制定参考基准回路,从而正确地选定试验回路,保证断路器的断流容量。

随断流容量不断增大,合成试验回路大大发展,捷克的论文讨论了合成回路的等值性

问题，法国的论文建议，带并联电阻的断路器，可采用不带电阻进行试验的方法。为此，给出了暂态恢复电压的等值变换曲线。

断路器可靠性问题是本届会议第一次提出讨论的新问题。断路器可靠性研究小组提出了一份中间报告，讨论了可靠性的定义、故障分类、资料的收集和整理等有关问题，并推荐了一套可靠性试验程序。通常机械强度试验规定操作一千次，程序中建议提高到一万次。从目前断路器的故障统计情况来看，由电气原因引起的故障很少，而主要是由机械原因引起的。瑞士、挪威等国统计结果表明，机械故障占80%~90%。运行故障资料统计工作对研究可靠性很有必要，工作组建议在国际范围内组织这一工作，明确资料收集目标，制定统一的调查表。

为了使有关同志了解本专业的讨论简况，我们还将讨论纪要（13-00）附件译出供参考。

目 录

电弧和试验回路的相互作用 (13-01)	(1)
确定英国电力系统操作暂态电压的现场试验与分析 (13-03)	(10)
暂态恢复电压的试验模拟 (13-06)	(27)
关于高压断路器可靠性研究的中间报告 (13-07)	(35)
断路器机械性能和耐气候作用的能力对可靠性的影响 (13-08)	(48)
气吹断路器性能的改进 (13-09)	(53)
暂态恢复电压参数对断路器性能的影响 (13-11)	(76)
第13专业小组 (开关设备) 讨论纪要 (13-00) 附件	(97)
输电线暂态过程数字解算的经验 (13-02) 提要	(101)
断路器的可靠性和故障率 (13-04) 提要	(102)
断路器研制工作中的电流过零测量 (13-05) 提要	(103)
利用控制论模型对紊流影响下灭弧室中电弧的研究 (13-10) 提要	(104)

电弧和试验回路的相互作用

(13-01)*

提 要

电弧和试验回路的相互作用现象由试验回路的布置所决定。试验回路中接线和阻尼电阻的电感等寄生参数会影响试验的结果,但这种影响主要是在开断失败或燃率高的区域。在开断失败或燃率低时,尽管电流过零附近电流和电压波形有所不同,但这种影响不会引起试验结果的差异。

在合成试验回路中电流的畸变比在等值的直接试验回路中要小。采用大的主电容器组可使这个差异较小。

本文介绍在合成电流注入方案的电压回路中所进行的123千伏、20千安空气断路器的试验。

1. 引 言

合成试验法对于开关技术有重要影响,这不仅在于用这种方法可以对断流容量很大的断路器进行试验。同时,这些新方法的等值性问题表明,有必要进一步了解断流过程。试验人员已经开始研究故障开断失败的原因,以及试验回路布置对试验结果的影响。一般都认为直接试验是可靠的,这种试验大多在开断分散区以下进行,预期试验大都是可以通过的。不希望发生开断失败的情况,并且,如果试验没有通过,不改变被试断路器一般就不重复进行试验。与此相反,比较性试验总是在开断分散区之内进行,因此开断失败的次数多,并且必须在同一断路器上重复进行多次试验。这种试验,要靠精确的测量来验证,特别是在电流过零附近。在这种情况下,电弧和试验回路之间的相互作用就来得明显,这种现象的多变性会使对结果的评价复杂化。这样,不仅需要考虑合成回路和直接回路的等值性,而且要考虑两种不同联接方式的直接回路的等值性。所以,试验回路(暂态恢复电压的起始波形)对断流现象的影响这个一般性问题已成为研究的中心。

2. 电弧与回路之间的相互作用

断路器与试验回路在整个断流过程中都相互作用。但是,在断流的各个阶段,回路各部分的影响是不同的。在电流过零附近,相互作用比较大,弧压及其变化引起了各支路中

* 作者H. MORAVOVÁ北乔维斯基电研所, V. NOVOTNÝ布鲁诺开关研究所(捷克)。

电流的畸变, 反过来电流的变化又影响电弧的动态性能。

2-1 相互作用期间试验回路的影响

试验回路的结构决定畸变电流和暂态恢复电压 (TRV) 的波形。回路的接线由两个基本要求来定:

- 一试验回路的型式 (合成, 直接);
- 一所要求的 TRV 波形。

前一个要求目前已经作了很具体的规定。在电流注入的合成试验回路中, 主电容器组是和电感串联的, 而在直接试验回路中, 电感则直接接到断路器。

对 TRV 波形的要求只是规定了 TRV 波形的上包络线。因此允许用各种结构的试验回路来形成 TRV。虽然这样能满足所要求的条件, 但在相互作用期间灭弧室所受的应力可能不同。图 1 表示在几个基本试验回路中计算所得的畸变电流和固有 TRV 的波形。图中还列有空气断路器可能发生的开断失败类型。

2-2 试验回路的寄生参数

由于寄生参数的存在, 试验回路更为复杂, 图 1 表示试验回路中有一个和断路器并联

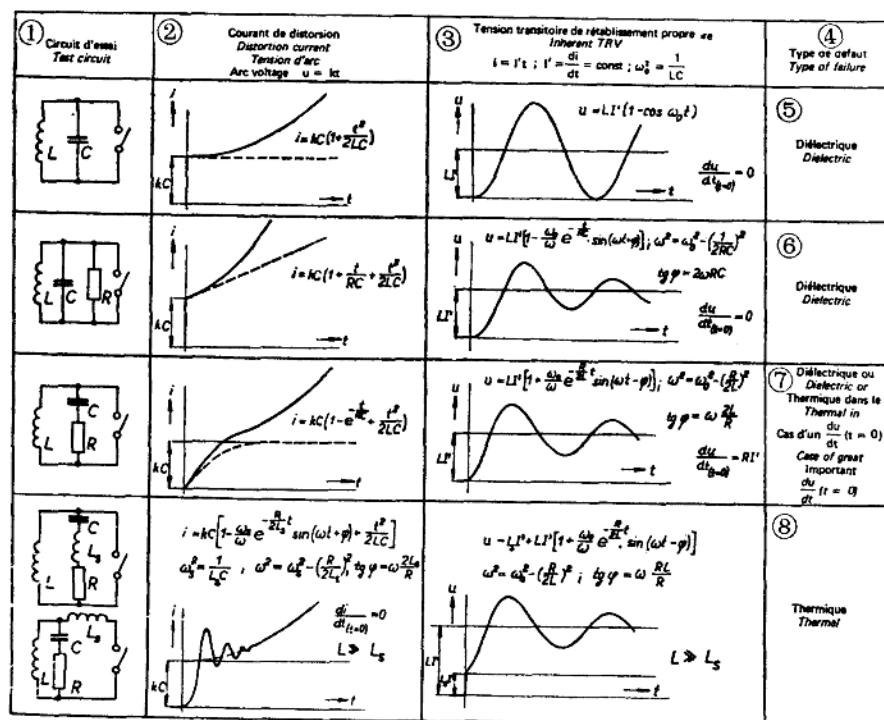


图 1 几个基本试验回路中的畸变电流和固有 TRV。弧压线性上升
 $L \gg L_s$; L_s —寄生电感; L —主电感

1—试验回路; 2—畸变电流, 电弧电压 $u = kt$; 3—固有 TRV; 4—开断失败类型; 5—介电的; 6—介电的;
7—介电的或热的 (在 $\frac{du}{dt}$ (t=0) 的情况); 8—热的

或串联的寄生电感 L_s ，例如连线和母线的电感。

这个电感的影响如下：

—畸变电流开始上升很慢，起始上升率为零，回路对弧压变化的响应滞后。

—TRV起始部分有一个跃变，其幅值取决于寄生电感数值和电流变化率。

在任何情况下，这种寄生电感都增加了发生热的开断失败的可能。

串联寄生电感的作用，特别是对于中压、大开断电流的断路器试验可能更显著。图2表示具有相同固有TRV的回路的一些典型试验记录。如果电流变化率由于弧压的影响而减弱，则TRV的跃变就较小（图2a）。电流上升越陡，TRV的跃变就越大，同时弧后电流也大（图2b、c），甚至会由于热的原因而开断失败（图2d）。

在调节TRV的并联支路中具有寄生电感的试验实例，将在3-3-1节中说明。

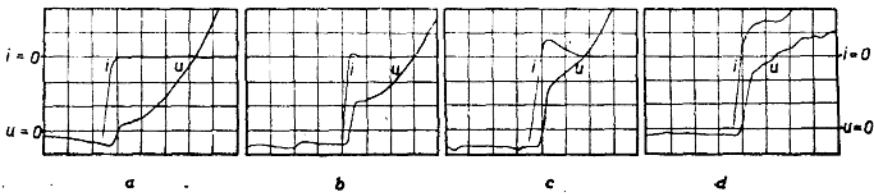


图2 12千伏、20千安空气断路器试验中所记录的电流、电压示波图

試驗回路具有母线串联寄生电感

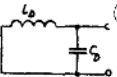
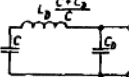
标尺：i—每格25安；u—每格500伏；t—每格20微秒

2-3 畸变电流

在合成回路和直接试验回路中，即使调节TRV的回路完全一样，相互作用期间弧压引起的畸变电流也互不相同。表1列出了几个基本的直接和合成回路中，由不同形状电弧电压所引起的畸变电流的计算结果。

在基本的直接和合成回路中，由不同形状电弧电压引起的畸变电流

表1

① Tension d'arc Arc voltage	② Courant de distorsion Distortion current	③ Circuit direct Direct circuit	④ Circuit synthétique Synthetic circuit	$\frac{\Delta i_r}{\Delta i_D}$
				
		$\omega_D^2 = \frac{1}{L_D C_D}$	$\omega_h^2 = \frac{1}{L_h (C + C_D)}$	
$u_{arc} = k$	$i_r = k \left[C_D \delta(t) + \frac{\omega_D^2 C_D t}{\Delta i_D} \right]$	$i_r = k \left[C_D \delta(t) + \frac{\omega_h C \sin \omega_h t}{\Delta i_{rS}} \right]$	$\frac{C}{C + C_D} \frac{\sin \omega_h t}{\omega_h t}$	
$u_{arc} = kt$	$i_r = k \left[C_D + \frac{\omega_D^2 C_D^2 t^2}{\Delta i_D} \right]$	$i_r = k \left[C_D + \frac{C(1 - \cos \omega_h t)}{\Delta i_{rS}} \right]$	$\frac{C}{C + C_D} \frac{1 - \cos \omega_h t}{\frac{(\omega_h t)^2}{2}}$	
$u_{arc} = kt^2$	$i_r = 2k \left[C_D t + \frac{\omega_D^2 C_D^3 t^3}{\Delta i_D} \right]$	$i_r = 2k \left[C_D t + \frac{C(1 - \frac{1}{\omega_h} \sin \omega_h t)}{\Delta i_{rS}} \right]$	$\frac{C}{C + C_D} \frac{\omega_h t - \sin \omega_h t}{\frac{(\omega_h t)^3}{6}}$	

1—弧压降；2—畸变电流；3—直接試驗回路；4—合成回路；

ω_h —注入电流的频率； ω_D —TRV的频率； δ —狄拉克函数

Δi_r 和 $\frac{\Delta i_r S}{\Delta i_r D}$ 的时间函数示于图 3。

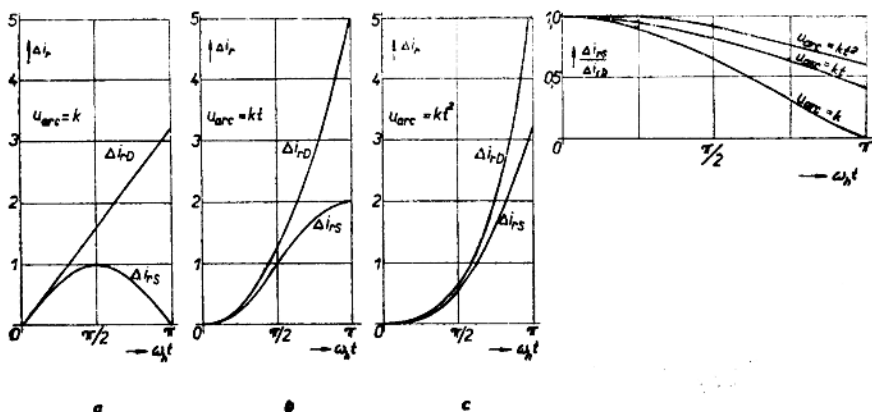


图 3 当 $C \gg C_D$ 时, 在直接和合成回路中的畸变电流的差值

u_{arc} —电弧电压; Δi_r —畸变电流的差值(D —直接的, S —合成的); ω_h —注入电流的频率; C —主电容器组;
 C_D —TRV 控制电容

由此, 得出如下结论:

- 合成回路中的畸变电流比直接回路中的小。
- C/C_D 的比率越小, 则上述差别越显著。
- 当电弧电压变化较陡时, 差值减小。
- 差值随电弧电压的变化(时间)而增加。

上述最后一项结论和 IEC 关于合成试验的报告中所提的要求一致, 过渡到满参数的时间应小于电流注入时间的四分之一。电弧电压显著变化的时间应当更短[1]。根据其他论文关于等值性问题的结论[1、2、3], 直接和合成回路中畸变电流之间的差别与比值 C/C_D 有关, 也就是和注入电流频率与 TRV 频率之比有关。特别是当主电感小而开断电流大时, 畸变电流通过主电感的分量不能忽略不计。

3. 试验的说明

3-1 总论

捷克斯洛伐克的短路试验站几年来详细研究了断流过程。大多数的试验仅在电流注入的合成电压回路中用专门设计的断路器进行。

在这些试验中, 用同轴分压器(时间常数为 2×10^{-8} 秒)和双线示波器(放大器频带宽度为 50 兆赫)持续测量电流过零附近的电流和电压。

这些试验具有下列优点:

- 可以用来进行大量重复性的试验, 而费用较低。
- 断路器是特制的, 触头磨损极为轻微, 足以保证各次试验之间互无影响。

一灭弧后，电弧间隙不会再次受大电流的作用。开断试验通过与否，失败还是成功取决于相互作用现象。

下面介绍1970~1971年试验站在空气断路器上进行这种试验的结果。

3-2 试验条件和结果

回路的接线方式可产生四参数的 TRV (图4左)。两个比较回路A和B的回路元件数值见图中表格，其额定参数为123千伏、20千安。两个回路的固有TRV曲线完全一样，如图4右所示(粗实线)。

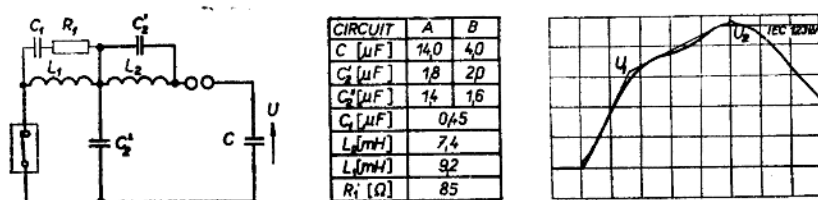


图4 比较试验的条件

左——四参数 TRV 的试验回路接线；
中——回路元件的数值；
右——固有 TRV 曲线，时间标尺每格100微秒；
粗实线——无感电阻；细实线——具有电感的电阻

两个比较回路的区别仅在于主电容器组的电容不同，即注入电流的频率不同(A回路为315赫，B回路为530赫)。而两个回路的电感值相等，特别是调节 TRV 高频分量的 $R_1-L_1-C_1$ 回路是相同的。回路的空间布置也一样，所以各个寄生参数都可做到完全一致。

对主电容器组C充以不同的电压U，可得到不同的开断失败或然率。用固定参数和同

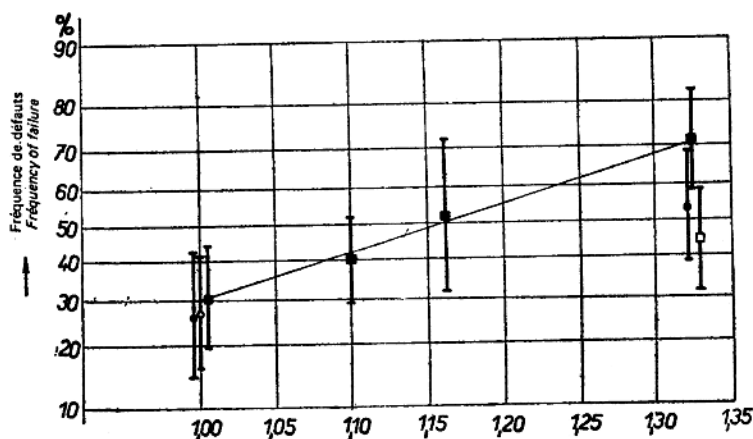


图5 试验结果，开断失败或然率和置信范围

●——有感 } 阻尼电阻，试验回路A(315赫)；
○——无感 }
■——有感 } 阻尼电阻，试验回路B(530赫)；
□——无感 }
×——试验断路器的应力(表示所加电压的相对值，见表2)

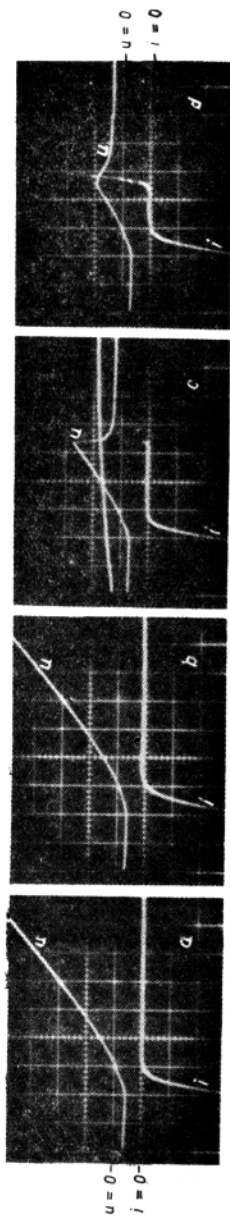


图 6 在无感阻尼电阻的试验回路中记录的典型示波图
标尺: u —每格10千伏; i —每格10安; t —每格10微秒

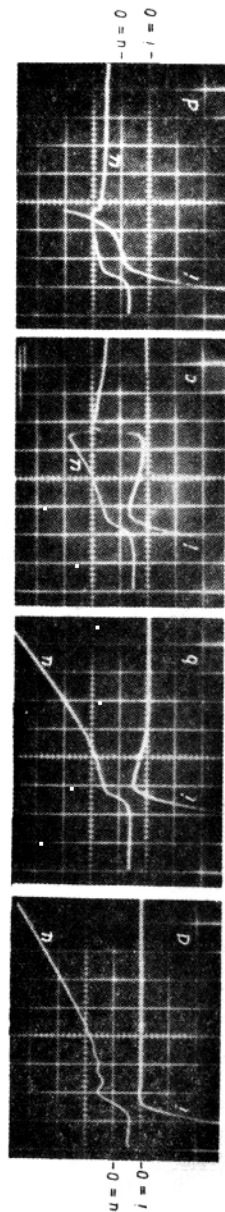


图 7 在有感阻尼电阻的试验回路中记录的典型示波图
固有 TRV 的跃变, 相对幅度 10%, 标尺与图 6 相同

样欧姆值的有感或无感阻尼电阻重复进行几个试验系列。由于调节 TRV 的回路中有寄生电感, 开断失败是由热的原因造成的, 在这种情况下, 电弧和回路之间的相互作用最强。相应的固有 TRV 曲线示于图 4 右(细实线)。

初步试验发现, 最低应力(即充电电压) $x = 1$ 时失败或然率为 25%, 最高应力 $x = 1.32$ 时为 60%。试验参数和试验结果列于表 2。

失败或然率示于图 5 中。图中还示出了置信范围(即分散度)。用 $x = 1.1$ 和 $x = 1.16$ 的应力作补充试验, 其结果证实在此范围内的分布非常接近正态分布。

图 6 和 7 示出了几个试验记录的典型示波图。

3-3 试验结果的讨论

3-3-1 典型电流和电压曲线 在有感阻尼电阻的试验回路中, 除了一个特例外, 开断失败都是由于热的原因(见表 2)。成功灭弧后有显著的弧后电流(图 7b)。甚至在电流过零附近, 电流的变化率仍很大。相反, 在无感阻尼电阻试验回路中, 开断失败主要是由于电击穿(介电失败)。即使在 TRV 最起始阶段发生的重击穿(图 6c)也是电击穿。然而, 典型的重击穿发生在 TRV 数值较高时, 在最低应力 $x = 1$ 的情况更是这样。电流和电压的波形与热失败时的显然不同。过零前电流变化率小, 电压也没有起始跃变。灭弧后没有弧后电流(图 6a), 或只有很小的弧后电流(图 6b)。

试 验 结 果 表 2

应 力 x	参考电压(图 4)		固有的 $\frac{di}{dt}$ 安/微秒	试验次数	失 败 次 数			失 败 或然率 %	95%的置信范围 %	阻 尼 电 阻
	U_1 千伏	U_2 千伏			热 的	介电的	总 计			

试验回路 A, 注入电流频率 $f = 315$ 赫

1.00	80	120	4.8	42	10	1	11	26.2	14.2~42.9	有感
				49	0	13	13	26.5	15.3~41.9	无感
1.32	106	159	6.4	43	23	0	23	53.5	37.7~68.8	有感

试验回路 B, 注入电流频率 $f = 530$ 赫

1.00	80	120	4.8	58	18	0	18	31.0	19.6~44.5	有感
1.10	88	132	5.3	78	31	0	31	39.7	28.9~52.0	有感
1.16	93	139	5.6	25	13	0	13	52.0	31.3~72.2	有感
1.32	106	159	6.4	59	42	0	42	71.2	58.2~82.3	有感
				54	8	16	24	44.4	30.9~58.6	无感

3-3-2 开断失败或然率低的区域 在最低应力 $x = 1$ 时(图 5), 各种试验回路的失败或然率基本相等。虽然无感或有感阻尼电阻的试验回路的断流过程很不相同, 但置信范围却完全重叠(见 3-3-1 节)。由此可以推断, 试验的结果仅决定于被试断路器的性能(吹弧性能的分散性)。如果电流过零的条件不太严格, 相互作用现象只能在电流过零时或过零后一段时间内显示出断路器的这个弱点。这样, 可以说电弧和回路之间的相互作用

对试验结果（开断成功或失败）没有多大影响。回路结构不同，开断失败的性质可能不同，但最终结果是同样的。

3-3-3 开断失败或然率高的区域 在所取的最高应力 $x=1.32$ 时，失败或然率彼此不同（图 5），置信范围也仅有部分重叠。

在注入电流频率较高的回路 B 中，采用无感还是有感阻尼电阻对试验结果影响显著。在有感的情况下，失败或然率几乎比无感时高一倍，并且其置信范围的下限与无感情况的上限衔接，互不重叠。

回路 B 的失败或然率高于主电容较大的回路 A 。

同失败或然率低的区域（3-3-1 节）相比，在无感情况下，电流过零时电弧间隙上的应力较小，没有排除热失败的可能。这样，试验结果不仅决定于断路器的性能，而且决定于电流过零附近的相互作用过程。如果过零条件更严格，则试验的最终结果就会改变。在注入电流频率低的试验回路（回路 A ）中，失败或然率也会增加。

在这一较高的应力下，主电容较小的试验回路 B 中的畸变电流的降低（见 2-3 节）会造成失败或然率的显著增加。特别是当电弧电压在大电流应力下保持不变，并且合成试验回路中畸变电流进一步降低的情况下，更是如此。

回路 A 和 B 试验结果不同的另一个原因，是两个回路中电弧电压对四参数固有 TRV 的影响不同。在主电容较小的情况下，畸变电流通过试验回路的各个分支，就会引起双频试验回路元件上电压降的变化。对于试验回路 B ，每次试验所得的 TRV 曲线都不同；相反，用试验回路 A （ C/C_0 的比率大）则看不到 TRV 的差异。

4. 结 论

一电弧和试验回路的相互作用决定于回路元件的布置。目前，对于四参数 TRV 的试验回路规定得还不够具体，今后应规定试验回路的详细接线，特别是断路器附近的接线。

一试验回路的寄生参数对断流过程有影响。这种影响至少对大断流容量的试验结果可能是决定性的。

一在合成和直接试验回路中畸变电流曲线的差别，在下列情况下，可以忽略不计：

- a) 在合成回路中使用的主电容比调节 TRV 的电容大得多；
- b) 电弧电压显著变化的时间比电流注入时间短；
- c) 在电流过零以前电弧电压的变化快。

设备容量足够的试验站可以满足这些条件。

一相互作用现象在开断失败或然率高的范围内显然是重要的。但是，在这个范围内，由比较性试验得出的试验结果可能出入较大，而在断流容量具有足够裕度的正常试验中，试验结果主要决定于被试断路器的性能。

一在失败或然率低的范围内，相互作用过程的差别可能引起电流和电压波形的偏差，但试验结果主要决定于断路器本身。

参 考 资 料

- [1] HEROIN P., BOUTTEAU M., MENDES A., SCHEKTMAN N., -Influence of parameters relating to the high voltage source during current injected synthetic testing. (CIGRE, 1970 No. 13-12)
- [2] GRYCZ B., -The equivalence of the fundamental circuits for synthetic and direct testing in view of the interaction between the arc and the circuit. (CIGRE, 1970, No. 13-08)
- [3] MORAVOVÁ H., -Equivalence of the stress of circuit-breakers in a synthetic and direct circuit. (Elektrotechnický obzor 1968; No. 9, pp. 480-486)

确定英国电力系统操作暂态电压的现场试验与分析

(13-03)*

提 要

由于电压和电流的增大,对系统开关设备及其他元件的要求增加了,因此,确定系统元件及系统的暂态性能就越来越重要。本文论述了低压注入试验、现场试验、暂态分析仪和数字计算机等方法在确定暂态电压方面的应用,以及这些方法所受到的限制。列表给出使用这些方法所获得的系统参数,并介绍它们在英国中央发电局的英格兰和威尔士电力系统中在控制操作过电压和确定绝缘水平方面的应用。

1. 引 言

为了选定系统元件的绝缘水平和开关参数,必须准确地了解操作暂态过程,这一点在近十年来变得明显了。随着系统电压水平的提高,选定最佳的绝缘和操作过电压水平无论在技术上还是在经济上都越来越重要。要做到这一点,必须准确地了解系统的暂态性能。

由于有了较好的计算设备,可以制定大型电网的暂态过程计算程序。暂态网络分析仪也同样有所改进,能够分析三相操作暂态过程和参数变动时的响应灵敏度。此外,对系统和单个元件进行了较完善的测量,以验证计算技术,并查明还有哪些领域需要进一步研究,以及提供数学分析用的输入数据。本文介绍了这些技术在英国中央发电局系统上的应用和结果。

2. 基本扰动函数

了解系统的全部暂态响应是没有必要的,只须了解操作引起的暂态电压和电流所特有的扰动函数就行了。斜形波、截波和直角波三种基本函数及其组合足以表示实际情况的大部分。斜形波代表切断架空线故障电流所产生的三角形暂态响应,对断路器来说,这是特别苛刻的。因此,需要知道各种架空线或架空线—电缆混合线路的斜波响应;由于电源电压对断路器产生的附加作用,还需要知道变电所母线和变压器的斜波响应。切断小电感电流时(如切除空载变压器或电抗器)会产生截波函数。由于断路器的电弧不稳定,使电流

* 作者 M.G.DWEK, J.E.HALL, R.L.JACKSON 和 B.JONES 中央发电局(英国)。

在最后几个安培时被“截断”，并在模拟变压器的 LCR 回路中产生振荡响应，截波形过电压提高了断路器、变压器或电抗器绝缘上的电应力。这就是变压器—电抗器的“截波”响应。要评价断路器和其它系统元件的工作状况，就需要研究这种响应。直角波函数与线路合闸有关，把直角波加到一条架空线路、电缆线路或架空线—电缆混合线路上，由于反射和连续反射，在线路参数改变的地方，如开路端、电缆与架空线路连接处等，将产生过电压。

3. 测量方法

3-1 现场试验

使用选定的断路器和系统元件组合进行现场试验是获得资料的一种办法。在英国 132 千伏和 275 千伏系统中进行了大约 50 次范围广泛的现场试验，如近区故障[1]，切合变压器和电抗器，架空线—电缆混合线路的合闸，长线路的切合[2]等，用精密的电容分压器测量电压，用现场的电流互感器测量电流[3]。在某些试验中，高压回路上装分流器、并接于法拉第笼内的示波器[1]。最近使用光束将讯息直接送到处于地电位的仪表。控制装置可以使断路器在一个周波上的任何瞬间动作，同时释放记录装置。

3-2 低压注入试验

现场直接试验虽然在某些方面是理想的，但费用高，时间长，并且不灵活，难以改变影响暂态响应的参数。此外，作某些故障试验时，对用户有干扰；因此，直接试验的次数是有限的。越来越多使用低压注入试验法作现场试验的补充，用辅助的方法和较低的功率来模仿产生斜形波、截波或直角波暂态电压的断路器操作。用此方法可以广泛地研究暂态响应，例如，为了研究暂态响应的变化，可以在变压器上加电容，在灭弧室上加阻尼电阻等。低压试验是测定系统元件参数（如架空线路的波阻抗、50 赫和高频电感）的简便方法，这些参数可用于操作暂态现象的计算或暂态网络分析仪研究。

所有主要参数可由一次或多次单相试验推导出来，因此除少数特殊情况外，不需要作三相低压注入试验。用一般的 50 赫配电电源，通过降压变压器注入被试系统元件，然后在电流过零时用晶体二极管切断电流，就可得到“斜波扰动函数”。必须仔细挑选二极管，以便干净俐落地切断电流，避免暂态电压的畸变。注入电流值各不相同，变压器用几安，架空线路和母线用几百安。用水银湿簧继电器代替二极管，很容易得到“截波”函数。水银湿簧继电器能够干净地切断几十毫安电流，承受约 800 伏的电压。“直角波”注入试验的主要要求是采用低阻抗的电源，使波头畸变很小。可以用充电的电容器作低阻抗电源，用水银湿簧继电器作开关。时间常数 CZ ，（电容乘以被试架空线路或电缆的有效波阻抗）选定为需要分析的时间的 10 倍左右，电压一般用 1.2 千伏，以减少干扰的影响。

当回路的响应特性有两个频率时（例如变压器），产生斜波形恢复电压的操作会降低高频分量。这个效应可利用来简化研究暂态电压用的模拟，但在分析截波过电压时会引起误差。针对要分析的现象或参数，使用正确的扰动函数是重要的。

低压测定的参数是否适用于全电压或者必要时允许外推，必须加以证实。根据作者的

经验, 只有很少的情况, 例如空载变压器, 需要考虑非线性问题。只有电感与频率的关系可以当作线性电路元件来对待。在分裂导线情况, 由于短路电流的作用, 次导线间会相互吸引靠拢。但是, 在动态情况建立之后, 任何瞬间的参数仍可用线性的方法计算出来。

3-3 带电测定系统固有恢复电压

为了测定电力系统的总的暂态反应, 低压注入技术是不适用的; 因此, 曾试用过测量切断小电容电流时的低幅值电压响应的方法[4]。这种系统固有暂态响应测量方法的优点是: 对用户干扰小, 且易于进行。存在的问题是不能象理想断路器那样地切断电流, 低幅值暂态电压的测量也有困难。

3-4 过电压计数器

为了获得英国系统过电压的统计资料, 在一些选定的地点, 通过分压器接装过电压计数器, 来记录超过 4 倍幅值的过电压次数, 所记录的最高电压接近闪络电压。在安装计数器的各处要记录所有可能使计数器动作的断路器操作和雷电活动, 以便分析记录材料。

4. 分析计算方法

由于数字计算技术的应用, 近年来操作暂态现象的分析有所发展[5、6、7]。数字计算技术现已广泛地用来确定操作过电压, 以供设计、计划、运行和事故分析之用。但在某些方面, 特别是对于变压器之类还没有数学模拟的设备, 或者是在研究参数变化的影响时, 仍继续使用暂态网络分析仪。

分析计算方法是同测量技术一起发展的。广泛进行现场试验和低压试验可以检验计算技术及其基本假定和系统参数、设备参数的数学模拟是否正确。

4-1 数字计算机法

4-1-1 集中参数程序 (FIDEN3) 这个程序可以计算集中参数(线性自感和互感、电容、线性或非线性电阻)网络对给定瞬间所加的各种电压或电流扰动函数的暂态响应, 并作为时间的函数表达出来。为了求解网络微分方程, 可系统地使用电网拓扑法[8、9]和数字积分法。把对 10 万千瓦安、275 千伏并联电抗器的计算结果和切合试验结果进行比较, 确证了这个程序。图 1 为截断 35 安电流时电抗器上暂态电压的测量值与计算值的比较。图中附有电网结线简图和关键参数。

4-1-2 单相行波程序 (BESS01) 这个程序是以施奈德-伯杰龙 (Schnyder-Bergeron) 单相架空线路行波方程式图解法为基础[10], 每隔一段时间计算出单相电网的暂态电压和电流。用集中电感和电容模拟输电线路。避雷器的模拟是可能的。合闸过程就是把两个起始电压不同的网络联接起来; 切断过程是通过向切除电源电压后的网络注入电流来模拟。可利用绘图装置。

这个程序可用来进行初步分析, 并适用于很多情况。运行费用低, 计算时间大约仅为相应三相计算时间的十分之一, 分析用的数据较易准备, 例如用波阻抗和行波时间就可以代表一回线路。这个程序忽略了相间的影响, 并假定只有一个行波传播方式, 所以是有局

限性的。它不能直接模拟与频率有关的行波衰减和畸变，但通过改变线路冲击特性参数，使之与所研究的暂态过程主要频率相对应，就可得到改善。

关于这个程序的验证，以及它同以“比尤利点阵”和“改型傅里叶变换法”为基础的行波程序之比较，在参考资料[1,10]中已有论述。图2是275千伏系统电源侧暂态恢复电压（TRV）的计算结果与系统测量结果的比较。

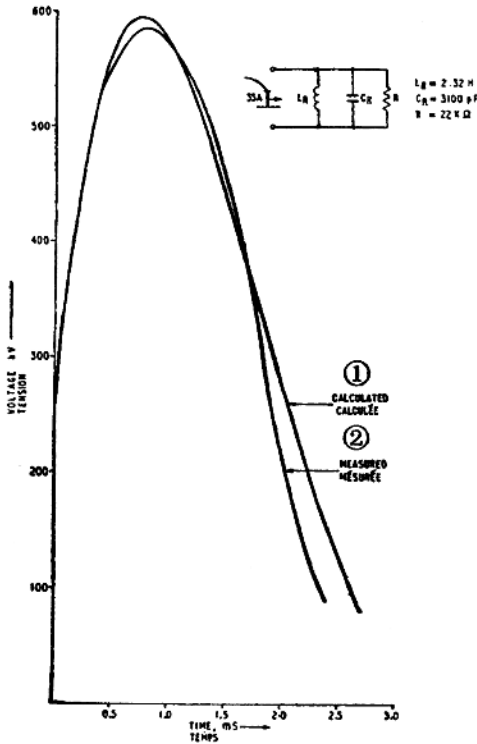


图1 切断10万千瓦安、275千伏并联电抗器时产生的过电压的计算值与测量值的比较
纵座标——电压，千伏；横座标——时间，毫秒；
1—计算值；2—测量值

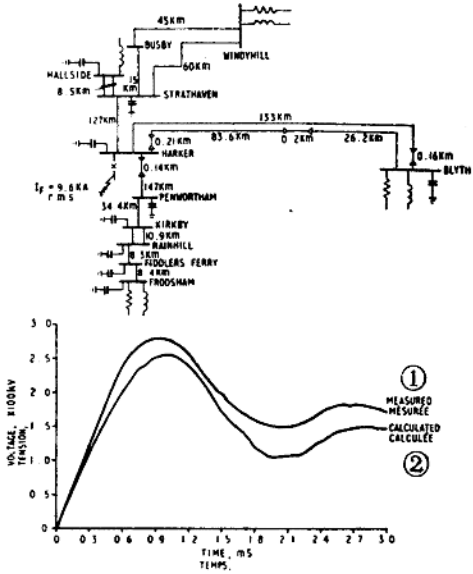


图2 电源侧暂态恢复电压计算值与测量值的比较
1—测量值；2—计算值；纵座标——电压，100千伏；横座标——时间，毫秒

4-1-3 三相行波程序（BESSO 3） BESSO 1程序已扩大并用于三相网络。为了考虑架空线路之间以及相间的耦合作用，首先在这一模式范围内进行计算，然后将它转换为网络节点处各相的量。

断路器带或不带合闸电阻的三相顺序合闸，是可以模拟的。三相架空线路合闸时，操作过电压的计算结果和测量结果是互相吻合的[2]。

4-1-4 三相架空线路的工频—冲击参数程序（BESSO 2） 此程序用于确定双回三相线路的工频阻抗和冲击波阻抗。用多导线矩阵法进行参数计算[11,12]并用卡森(Carson)法确定大地回路的频率特性；并可模拟孤立分散的塔脚阻抗[13]。用此程序，计算出单回或双回线路的各种布置和地线在规定频率下的相序模式参数。这些参数可以存储，以便输入 BESSO 3。

把工频阻抗和波阻抗的计算结果同用低压注入法及全电压测量所得的结果作了比较