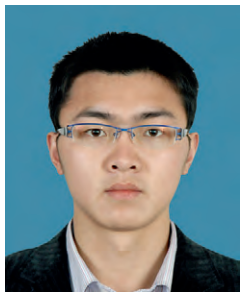


超长220 kV电缆谐振耐压

为保障电缆投运后的安全可靠运行,需现场进行交流耐压验收试验。以两条220 kV超长交联聚乙烯电缆为试验实例,分析计算了耐压方案;试验过程中采取多种措施降低系统损耗,提高试验回路品质因素;分析了系统品质因素的影响因素,考察了系统能量损耗情况。现场试验表明,串并联混合谐振的试验方法对超长电缆进行交流耐压是可行的,电抗器温升对系统品质因素影响较大。

刘君 胡琳 杨帆 杨新春 朱虎/国网成都供电公司



刘君/工程师

伴随着城市化进程的不断推进以及城市市容建设要求,超长电缆的使用越来越广泛。虽然这些电缆在出厂时经过严格的出厂试验,但运输、存储、施工到附件安装的过程中,可能存在受潮、机械损伤和工艺不规范等造成的缺陷。因此,要求在新建电缆竣工后投运前,进行现场交流耐压验收^[1-2],以及时发现缺陷,保障投运后的安全稳定运行。目前,国内外对串并联混合谐振耐压试验方法进行了广泛的研究,积累了大量的现场经验^[3-4]。但随着电缆长度及电容量的增加,交流耐压试验设备容量、现场布置和耐压过程中的品质因素等限制因素增多^[5-6],10 km以上的电缆耐压研究还未见报道。本文针对220 kV桃乡—双桥子一线(型号:YJLW02-Z-127/2201×2500,长度:13.713 km,电容量:0.235 μF/km)、220 kV桃乡—双桥子二线(型号:YJLW02-Z-127/2201×2500,长度:13.679 km,电容量:0.231 μF/km),进行串并联混合谐振耐压。分析计算了耐压方案;试验过程中采取多种措施降低系统损耗,提高试验回路品质因素;分析了系统品质因素

的影响因素,考察了系统能量损耗情况。

谐振耐压原理

1. 串联谐振

图1为串联谐振工作原理图。图1中, T_1 为调压器; T_2 为励磁变压器; L 为谐振电感; C 为负荷电容,包括试品电容、高压回路电容及电容分压器电容; R 为整个高压试验回路中损耗的等效电阻,通过调整系统频率,选择合适的电抗 L 及可到达谐振^[7-8]。可得

$$U_m = IX_C = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} X_C \quad (1)$$

当串联谐振时 $X_L = X_C$,则

$$U_m = \frac{U}{R} X_C = \frac{U}{R} X_L \quad (2)$$

设谐振回路的品质因数 Q ,则 $Q =$

$$\frac{\sqrt{L}}{\frac{\sqrt{C}}{R}} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR}, \quad U_m = QU, \text{ 即被试品}$$

上获得的电压为励磁电压的 Q 倍,即串联谐振可以补偿电压。

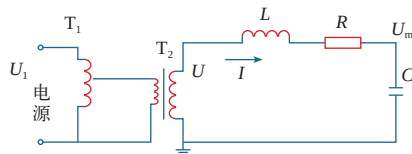


图1 串联谐振工作原理图

2. 并联谐振

图2为并联谐振原理图,由图2可知

$$I_L = \frac{U}{R + j\omega L} \quad (3)$$

$$I_C = j\omega CU \quad (4)$$

当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时,发生并联谐振,此时

关键词/Keywords

- 谐振 · 127/2201×2500, 长度: 13.713 km,
- 耐压 · 电容量: 0.235 μF/km)、220 kV桃
- 品质因素 · 乡—双桥子二线(型号: YJLW02-Z-
- 损耗 · 127/2201×2500, 长度: 13.679 km, 电容量: 0.231 μF/km), 进行串并联混合谐振耐压。分析计算了耐压方案;试验过程中采取多种措施降低系统损耗,提高试验回路品质因素;分析了系统品质因素

$$I = \frac{1}{Q} I_C \quad (5)$$

即电感支路电流的无功分量与电容支路电流均为电源电流的 Q 倍, 并联谐振可以补偿电流。

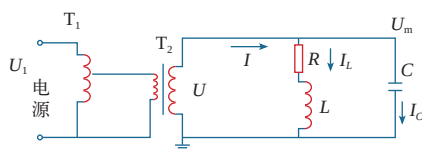


图2 并联谐振原理图

方案计算

两条电缆单相电容量最大为 $3.23 \mu\text{F}$, 以下计算按最大电容量考虑。目前备用电抗器有六台, 参数如表1所示。

表1 备用电抗器参数

电感量/H	额定电流/A	额定电压/kV	数量/台
33.3	27.3	220	4
54	22	220	2

变频柜的参数: 额定功率400 kW, 输入电压380 V, 输出电压0~350 V。励磁变压器参数如表2所示。

表2 励磁变压器档位及其参数

档位	1	2	3	4
输出电压/kV	2.4	4.0	6.6	8.6
输出电流/A	125	100	60.6	46.5

由于电缆长度达到13.713 km, 单相电容量最大为 $3.23 \mu\text{F}$, 简单的并联谐振或串联谐振皆不能满足试验要求。考虑可以综合补偿电流及电压的典型串、并联谐振电路。

1) 方案一。两台54 H并联后串入回路, 四台33.3 H电抗器并联后作为补偿, 如图3所示。

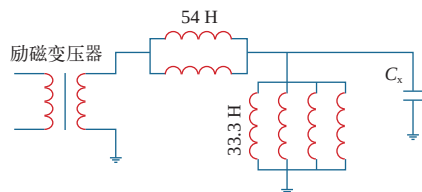


图3 串并混合谐振方案一

根据被试品电容量, 计算系统谐振频率为 $f=35.1 \text{ Hz}$; 54 H电抗器流过总电流为30 A, 即每台

54 H电抗器流过电流15 A, 满足设备要求。33.3 H电抗器流过总电流为97 A, 即每台33.3 H电抗器流过电流24.25 A, 满足设备要求。励磁变压器输出电流需达到30 A, 按照上述要求, 选择400 kV·A励磁变压器。

2) 方案二。四台33.3 H电抗器并联串入回路, 两台54 H并联后作为补偿, 如图4所示。

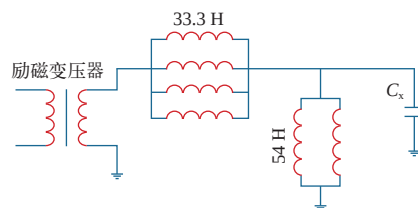


图4 串并混合谐振方案二

根据被试品电容量, 计算系统谐振频率为 $f=35.1 \text{ Hz}$; 54 H电抗器流过总电流为30 A, 即每台54 H电抗器流过电流15 A, 满足设备要求。33.3 H电抗器流过总电流为97 A, 即每台33.3 H电抗器流过电流24.25 A, 满足设备要求。励磁变压器输出电流需达到97 A, 按照上述要求, 选择400 kV·A励磁变压器。

对于方案一及方案二, 试验对象及流过每台电抗器的电流在理论计算上结果一致, 因此系统的能量损耗应该一致。但是由于方案一中, 系统提供的电流只有30 A, 为了维持系统的能量损耗, 这就势必会抬高励磁变压器的输出电压, 降低了系统的 Q 值。在220 kV石羊站进行220 kV石安一、二线(长度分别为10.755 km、10.775 km)电缆耐压时得到验证, 如果励磁变压器电流输出小, Q 值下降越明显。因此, 选择方案二作为本次耐压方案。

方案实施

(1) 电源的提供

按照上述要求, 选择400 kV·A励磁变压器。 Q 值仅需达到45即可, 若现场 Q 值满足该要求, 则: 励磁变压器选择中压4 kV、100 A档, 励磁变压器电压比 $K=11.428$, 低压侧电流为 $(97 \times 4/0.35) \text{ A}=1108 \text{ A}$, 考虑设备及线路损耗, 专门布置800 kV·A配电变压器作为试验电源。

(2) 互感的影响

由于互感对品质因素影响较大，对现场的布置进行科学设计，合理布局，保证电抗器间距在 $2d$ （ d 为电抗器线圈外径）以上。同时，接线呈开口状，避免形成闭环，如图5所示，将互感影响降到最低。

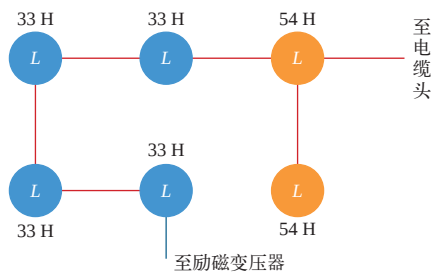


图5 现场电抗器布置位置及接线方式

(3) 降低损耗

电源连接线，由于电流均为几十安培，为降低回路损耗，选择 10 mm^2 的导线作为连接线，为降低电晕损耗，在电抗器顶端及电缆头上加装均压罩，并将所有回路连接线加装波纹管，进行均压。

品质因素考察

对耐压过程中的各参数进行记录，各参数所代表的意义如图6所示。同时，利用温湿度仪记录环境条件。利用红外测温仪测量电抗器的温度情

况，如图7所示。

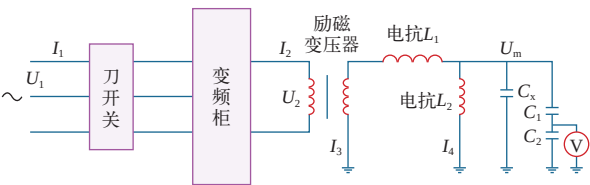


图6 各测试参数示意图

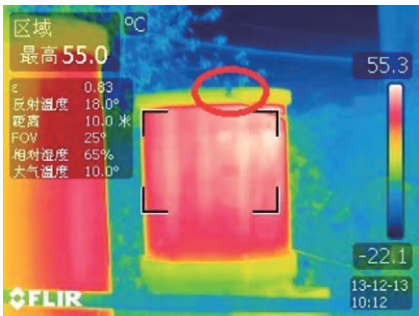


图7 红外测温仪监测电抗器的温度

在每相电缆耐压时，记录图6中各参数，以考察不同影响因素对 Q 值的影响。桃双一、二线六相电缆耐压中的参数测试如表3所示。其中， A_2 、 B_2 、 C_2 和 A_1 为连续耐压，从14：00装置安装到位开始耐压，到22：00 A_1 相耐压后，由于33 H电抗器 L_1 是密闭性良好，散热慢，较环境温度的温升已经达到其设计极限的60 K，因此只能中断耐压过程。等到第三天10：00再对剩余的 B_1 、 C_1 相进行耐压。

表3 耐压过程中的参数记录

线路	相别	U_2/V	I_2/A	I_3/A	I_4/A	f/Hz	U_m/kV	Q 值	L_1 温度/ $^{\circ}C$	L_2 温度/ $^{\circ}C$	气温/ $^{\circ}C$	湿度（%）
桃双二线	A_2	297	525	87.1	28.8	35	170	95.40	26	8	9	50
	B_2	321	529	87.2	28.9	35	169.2	87.85	48	15	8	65
	C_2	344	531	87.1	29.1	35	169.5	82.66	58	23	7	70
桃双一线	A_1	360	539	86.4	28.6	35.2	169.9	78.55	65	29	7	72
	B_1	296	518	86.5	28.8	35.2	169	95.16	29	6	6	50
	C_1	310	525	86.4	28.7	35.2	168.9	90.6	46	14	6	50

由于 A_2 、 B_2 、 C_2 和 A_1 为连续耐压，环境也为连续变化，可进行 Q 值规律考察。

由于电抗器温度变化大，首先考察电抗器 L_1 、 L_2 温升情况。在持续电流作用下，由于 L_1 在本次耐压前进行过其他电缆耐压试验，因此，在升压前， L_1 有初始的 $26\text{ }^{\circ}C$ 基础温度。加之，其密封性

好，其温升更为剧烈， L_2 在电流作用下，也有明显的温升，如图8所示。

由于耐压的试验地点选择在小山坡上，不仅有风，而且当天天气良好，即使到了晚上，湿度变化也不是很大。同时，由于电抗器的温度较环境温度高许多，因此，电抗器表面未形成凝露。

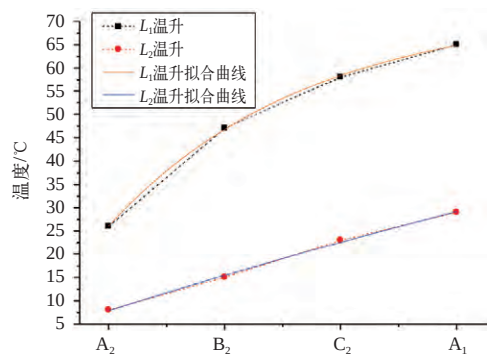


图8 耐压中电抗器的温升曲线

因此，首先考察电抗器温升与Q值的变化关系，如图9和图10所示。

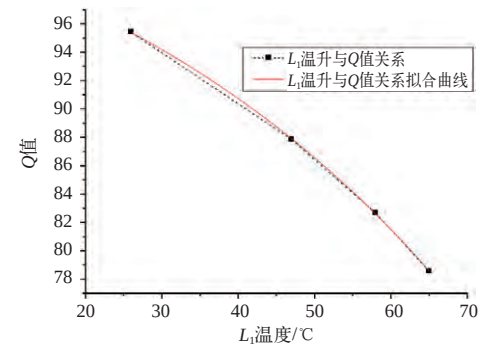


图9 L_1 温升与Q值的关系

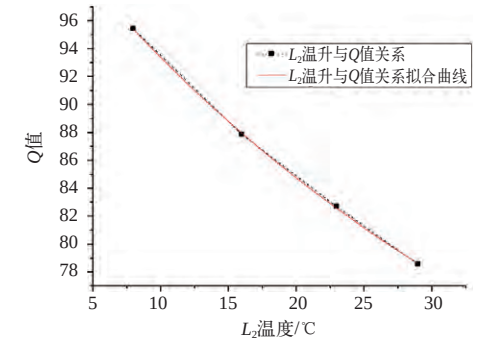


图10 L_2 温升与Q值关系

由图9和图10可见，由于 L_2 温升较小，因此， L_1 的温升对Q值的下降更为明显。 L_1 由于是串入回路，温升对系统的影响主要是电抗器 L_1 直阻的升高，造成发热更为严重，同时温度升高，其本身介损增大， L_1 总体损耗越大。 L_2 是并入回路，其电阻的增大，在电压一定的情况下，直阻能量损耗应该减小，但温度增加同时增大了 L_2 的介损，因此，其补偿电流也增大，总耗能增大。由于 A_2 、 B_2 和 C_2 为相同电缆长度连续耐压，考察其系统能

量损耗情况，在耐压前测试其温度、直阻及介损情况如表4所示。

表4 耐压中电抗器参数

相别	L_1			L_2		
	温度/℃	直阻/Ω	介损 (%)	温度/℃	直阻/Ω	介损 (%)
A_2	26	46.02	0.53	8	63.16	0.31
B_2	48	48.66	0.71	15	68.20	0.38
C_2	58	50.56	0.92	23	70.39	0.56

利用表3、表4的数据，计算能量损耗情况，结果如图11所示。

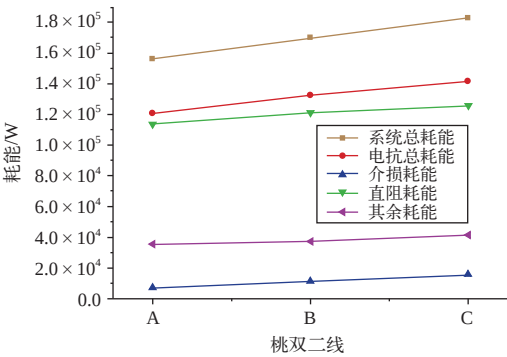


图11 桃双二线三相耐压过程中的能量损耗情况

可以看出，系统的总耗能随着耐压的进行，逐项增大其中，最主要的损耗来自于电抗器的直阻损耗，占总损耗70%左右。随着电抗器温度的升高，电抗器自身介损造成的损耗增长率超过直阻损耗的增长率。系统的附加损耗（电晕放电、漏磁损耗及电抗器互感损耗等）维持与系统总损耗一致的增长率，这部分损耗的增长主要由环境因素引起。

结束语

本文通过对两条13.7 km超长220 kV交联聚乙烯电缆为试验实例，分析计算了串并联混合谐振的试验方案，串并联混合谐振耐压时，应尽量选择电抗量小、承担电流大的电抗器串入系统进行电压补偿，使得励磁变压器在相同输出电压下贡献更多的功率。现场实施过程中，电抗器之间充足的距离、合理的接线方式、防电晕导线的使用以及良好的天气状况是升压成功的有效保障。耐压过程中，电抗器的温升明显，连续的耐压可

能会超过电抗器的设计标准。随着电抗器温度升高，系统总耗能明显增大，其中，最主要的损耗来自于电抗器的直阻损耗，占总损耗70%左右。随着电抗器温度的升高，电抗器自身介损造成的损耗增长率超过直阻损耗的增长率。系统的附加损耗（电晕放电、漏磁损耗和电抗器互感损耗等）维持与系统总损耗一致的增长率，这部分损耗的增长主要由环境因素引起。13.7 km超长220 kV交联聚乙烯电缆耐压的成功，为这类高电压、长电缆实施现场耐压提供了参考。

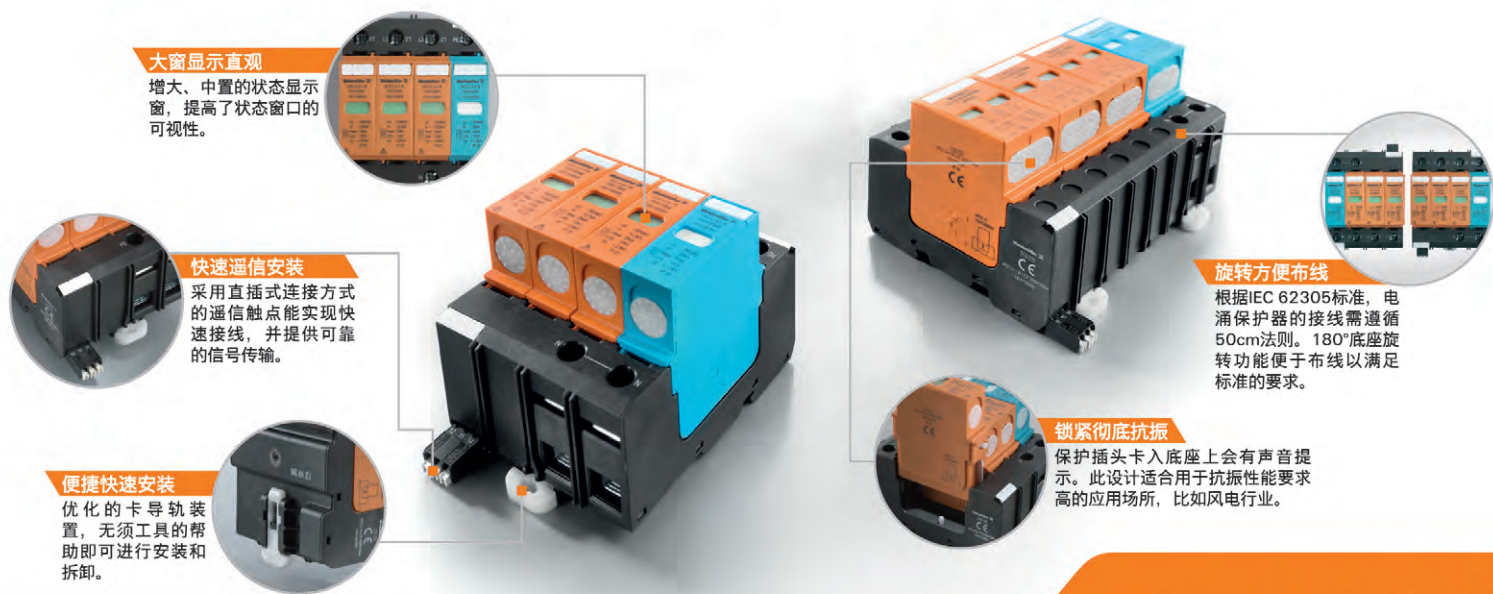
参考文献

- [1] 姚翔，陈林，李海生．高压交联电缆及附件的现场变频谐振试验[J]．高电压技术，2005，31(11)：61-62．
- [2] 刘玮，肖勇．220 kV交联超长电缆现场交流耐压

试验[J]．高电压技术，2008，34(4)：831-832．

- [3] GB/Z 18890.1~18890.36—2002 额定电压220 kV ($U_m=252$ kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件[S]．
- [4] 肖立华．220 kV XLPE电缆现场交流耐压试验[J]．华中电力，2003，16(1)：18-20．
- [5] 陈绍扬．浅析变频串连谐振耐压试验的应用[J]．广东电力，2004，17(5)：40-43．
- [6] 陶劲松，席成员，贺景亮，等．湖南110 kV长距离电缆耐压试验[J]．高电压技术，2002，28(11)：61-62．
- [7] 陈忠．串联谐振耐压试验的现场问题及解决方法[J]．电网技术，2006，30(增刊)：205-207．
- [8] 陈化钢．电力设备预防性试验方法及诊断技术[M]．北京：中国水利水电出版社，2009．

(收稿日期：2014-06-24) EA



大窗显示直观
增大、中置的状态显示窗，提高了状态窗口的可视性。

快速遥信安装
采用直插式连接方式的通信触点能实现快速接线，并提供可靠的信号传输。

便捷快速安装
优化的卡导轨装置，无须工具的帮助即可进行安装和拆卸。

旋转方便布线
根据IEC 62305标准，电涌保护器的接线需遵循50cm法则。180°底座旋转功能便于布线以满足标准的要求。

锁紧彻底抗振
保护插头卡入底座上会有声音提示。此设计适合于抗振性能要求高的应用场所，比如风电行业。

Weidmüller 

魏德米勒VPU系列电涌保护器 — 低压供电系统的升级版电涌保护卫士

魏德米勒VPU系列电涌保护器用于低压供电系统，符合2012年IEC/EN 61643-11国际标准，为您提供持久、安全、前瞻性的雷电和浪涌保护解决方案，并简化维修。

魏德米勒电联接(上海)有限公司

中国上海 电话: 021-22195883 网址: www.weidmuller.com.cn