

110 kV长距离海底电缆混联谐振耐压试验研究

杨世强, 王团结, 牛利涛, 雷 阳, 何信林, 张 鹏, 倪继文

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对某厂110 kV长距离海底电缆交流耐压试验要求容量较大、设备组合复杂的情况, 提出了合理的试验方案。采用混联变频谐振耐压试验方法, 通过改变电抗器的串、并联组合方式, 增加了试验灵活性。面对混联谐振计算烦琐的问题, 提出采用等效电感法将电路模型进行简化分析, 推导出混联谐振的频率计算公式、被试品电流计算公式和回路中电抗器电流的计算公式。最终通过现场试验与仿真验证了混联谐振方案的可行性与等效电感法优化电路模型计算的正确性, 对长距离电缆变频谐振耐压试验具有重要的参考价值。

关键词: 电缆; 谐振; 仿真

Test and research on hybrid resonance withstand voltage of 110 kV long-distance submarine cable

YANG Shiqiang, WANG Tuanjie, NIU Litao, LEI Yang, HE Xinlin, ZHANG Peng, NI Jiwen

(Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: For a 110 kV long-distance submarine cable AC withstand voltage test requires large capacity and complex equipment combination, a reasonable test scheme is put forward. The test method of hybrid frequency conversion resonance withstand voltage is adopted. By changing the series and parallel combination of reactors, the test flexibility is increased. In the face of the complicated calculation of the hybrid resonance, the equivalent inductance method is proposed to simplify the circuit model, and the frequency calculation formula of the hybrid resonance, the current calculation formula of the tested object and the current calculation formula of the reactor in the loop are derived. Finally, the feasibility of the hybrid resonance scheme and the correctness of the calculation of the circuit model optimized by the equivalent inductance method are verified by field test and simulation. It has important reference value for the frequency conversion resonance withstand voltage test of long-distance cable.

Key words: cable; resonance; simulation

0 引言

相对于传统火力发电, 近年来, 受国家相关风电政策影响, 海上风电迎来了抢装潮, 项目建设出现爆发式增长。在海上风电场建设过程中, “两站一缆” (海上升压站、陆上开关站和海

缆) 是影响并网发电最重要的三个环节。因此, 海底电缆是整个海上风电场建设十分重要的工程之一^[1]。

海上风电场发电之后需要向陆地输送电力并升压并网, 海底电缆可以有效传输海上风电

机组发出的电能。作为海上风电场电能输送重要通道,其安全可靠运行对海上风电场至关重要^[2]。

由于电缆被敷设在环境极其恶劣的海底,在运行中除了受到潮汐、波浪、冲刷及地震等自然条件的影响外,还受到海底物质的摩擦、人类或海洋活动的影响。因此,交联聚乙烯海底电缆的使用越来越广泛,高压交联电缆特别是110 kV及以上交联聚乙烯电缆在各发电企业开始大量使用^[3]。

本文的试验背景来源于江苏某海上风电场海缆发生接地故障后,依据江苏省发电企业电力设备交接和预防性试验规程要求,新做终端、接头或受其他试验项目警示,需要检验主绝缘强度时,应进行交流耐压试验。试验电压为 $1.6 U_0$,加压时间5 min,无闪络、无击穿^[4-5]。

本文针对电缆现场交流耐压的复杂性,在原来单一的串联谐振的试验方案上实行改进,提出了串联谐振与并联谐振混合试验的接线方案。该混联谐振方案通过串联电抗器产生串联谐振来提高试验电压,并联电抗器补偿被试品电容电流,减少流过串联电抗器的电流,从而降低试验对励磁变压器的容量要求。

1 串联谐振原理

串联谐振原理如图1所示。

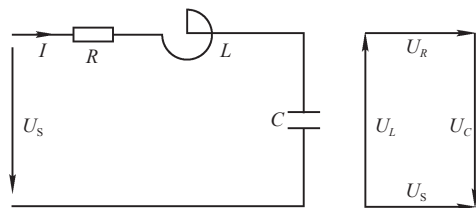


图1 串联谐振原理

Fig. 1 Principle of series resonance

串联电路的输入电阻为

$$\begin{aligned} Z &= R + j(X_L - X_C) \\ &= |Z| \angle \varphi \\ &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

可见存在一个角频率 ω_0 ,使感抗和容抗相

互完全抵消,即 $X_L = X_C$ 。当 $\omega < \omega_0$ 时,输入阻抗呈容性;当 $\omega = \omega_0$ 时,输入阻抗为电阻性;当 $\omega > \omega_0$ 时,输入阻抗呈感性。

当 $\omega = \omega_0$ 时,串联谐振频率为^[6]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

2 并联谐振原理装置

并联谐振原理如图2所示。

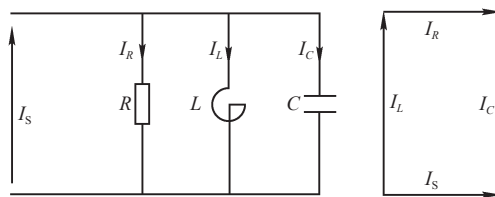


图2 并联谐振原理

Fig. 2 Principle of parallel resonance

并联谐振的条件是 $I_L = I_C$,并联谐振又称电流谐振。可得

$$\frac{U}{X_L} = \frac{U}{X_C} \quad (3)$$

进而得到并联电路的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

3 混联谐振原理

交流耐压试验是鉴定电力设备绝缘强度最有效和最直接的方法。对于长距离电力电缆进行交流耐压试验,存在试验电压高、电容量大等特点。如果单纯采用串联谐振交流耐压试验方式,由于被试品对地电容量很大,容易导致谐振频率过低,甚至低于20 Hz。因此,采用串并联混合谐振交流耐压试验方式,但串并联混合谐振在实际试验中存在试验频率不能直接计算、试验电源容量难以估算等问题,给试验工作带来了很大的麻烦。本文通过计算分析推导出串并联混合谐振试验频率计算公式和试验电源容量的估算方法,给试验工作带来了很大的方便。

电路回路中同时有并联与串联谐振称为混联谐振,其电路图如图3所示。本文将串联电感与

并联电感等效为一个电感,进行电路模型的简化分析,将其等效为图4所示电路。

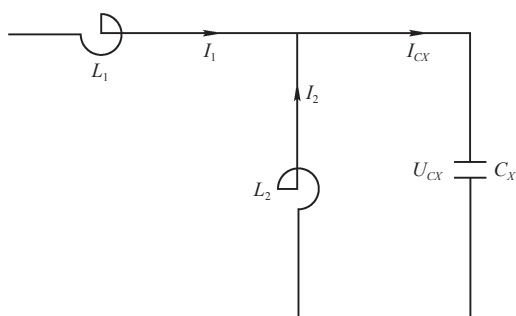


图3 混联谐振电路图

Fig. 3 Circuit diagram of hybrid resonance

根据基尔霍夫电流定理可得

$$I_1 + I_2 = I_{cx} \quad (5)$$

进而可得

$$\frac{U}{2\pi f L_1} + \frac{U}{2\pi f L_2} = 2\pi f C_x U \quad (6)$$

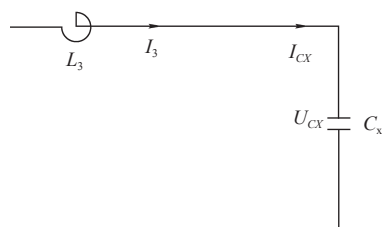


图4 等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram

由图4可知,谐振频率为

$$\frac{U}{2\pi f L_1} + \frac{U}{2\pi f L_2} = 2\pi f C_x U \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中,可得等效电感的计算公式为

$$L_3 = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (8)$$

此时,电路简化为串联谐振。

可得混联谐振电路的谐振频率为

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} C_x}} \\ &= \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_x}}} \\ &= \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{1}{L_1 C_x} + \frac{1}{L_2 C_x}}} \end{aligned} \quad (9)$$

由此可计算出在电压 U 下的被试品电流为

$$I_{cx} = \frac{U C_x}{\sqrt{\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} C_x}} = U \sqrt{\frac{C_x}{L_1} + \frac{C_x}{L_2}} \quad (10)$$

由此可计算出在电压 U 下的高压回路电流为

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U \sqrt{\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} C_x}}{L_1} \\ &= \frac{U}{L_1 \sqrt{\frac{1}{L_1 C_x} + \frac{1}{L_2 C_x}}} \\ &= \frac{U}{\sqrt{\frac{L_1 L_2 + L_1 L_1}{L_2 C_x}}} \end{aligned} \quad (11)$$

4 现场试验及仿真分析

本次试验对象为20 km的110 kV交联聚乙烯 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 海底电缆线路,其等效电容为 $4.62\text{ }\mu\text{F}$ 。线路的一端通过GIS终端连接至陆上变电站GIS内部。现场将海上变电站内电缆终端悬空,陆上变电站GIS进线气室拆开放气后,加装高压试验套管,再重新充气,并静置24 h。同时将线路TV及避雷器拆除,电缆过电压保护器短接接地。

试验时,高压引线连接至高压试验套管即可实现对被试电缆的电压施加。该变频谐振试验装置主要包括变频电源、试验变压器、电抗器和分压器等。现有相关设备参数如表1~表3所示。对设备选型,应当结合现有的试验设备,合理进行电感、电容匹配,尽量接近电缆实际运行工况。

本文针对现有试验设备及现场情况,给出多种设备组合方式的计算结果,如表4所示。由表4可知,传统的串联谐振试验电源电流为1 000 A左右,现场难以准备试验电源及电源电缆。对比三种混联谐振方式,其中方式4的谐振频率过低,不符合规程要求;方式3为最优的试验组合方式,其所需电源容量最小。因此,最终选取方式3进行交流耐压试验。

为验证试验方案的安全性及正确性，在PSACD中进行仿真验证，仿真模型如图5所示。其仿真试验结果与计算结果一致，试验波形如图6和图7所示。

在本试验中，选择两台19.1 H的电抗器（ L_1 ）串联和两台19.1 H的电抗器（ L_2 ）并联，如图8所示。将电抗器 L_2 与被试品并联后再与电抗器 L_1 构成串联谐振。代入混联谐振计算公式得试验频率 $f=26.8$ Hz（实际试验频率27.2 Hz），被试品流过的电流为 $I=79.62$ A（实际试验电流为83.5 A）。励磁变压器高压端的电流 $I=15.92$ A（实际试验电流18.8 A）。

在混联谐振回路中， L_2 补偿了部分电容电流，使 L_2 与试验电缆组成的并联回路仍呈容性，再与 L_1 构成串联谐振回路，降低了励磁变压器的输出电流。本次试验被试相施加对地交流电压为102.4 kV，加压时间5 min，加压程序如图9所示。图10为现场设备布置图。

表 1 电抗器参数

Tab. 1 Reactor parameters

电感量/H	额定电压/kV	额定电流/A	额定容量/kV·A
19.1	300	50	15 000

表 2 励磁变压器参数

Tab. 2 Excitation transformer parameters

档位	低压		连接	高压	
	电压/V	电流/A		电压/kV	电流/A
1	450	1 200	串联	8	50
2	400	1 200	并联	4	100
3	350	1 200		/	
型式容量/kV·A				400	

表 3 变频电源参数

Tab. 3 Parameters of variable frequency power supply

额定功率/kW	三相输出电压/V	单相输出电压/V	输出频率/Hz
450	0 ~ 380	0 ~ 350	20 ~ 300

图8中：TT为励磁变压器； L_1 为串联电抗器； L_2 为并联电抗器； C_1 、 C_2 为电容式分压器；

表 4 不同组合方式的计算结果

Tab. 4 Calculation results of different combinations

组合方式	1 串联谐振 (4 并后串)	2 混联谐振 (1 串 3 并)	3 混联谐振 (2 串 2 并)	4 混联谐振 (3 串 1 并)
串联电感/H	4.775	19.1	38.2	57.3
并联电感/H	—	6.37	9.55	19.1
谐振频率/Hz	33.9	33.9	26.8	19.6
试验电压值/kV	102.4	102.4	102.4	102.4
被试品电流/A	100.73	100.76	79.62	58.1
励磁变压器 高压侧电流/A	100.73	25.17	15.92	14.5
励磁变压器 低压侧电流/A	1 142	287	182	166

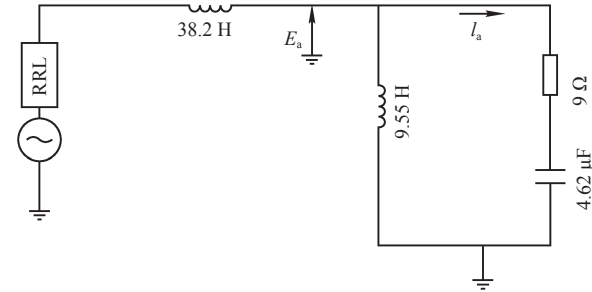


图 5 仿真模型

Fig. 5 Simulation model

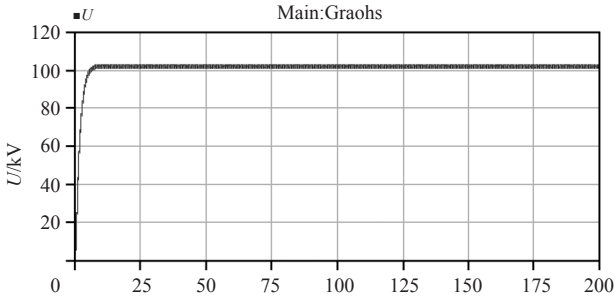


图 6 试品电压

Fig. 6 Sample voltage

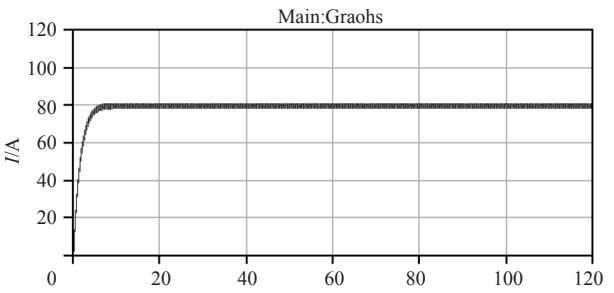


图 7 被试品电流

Fig. 7 Current of test object

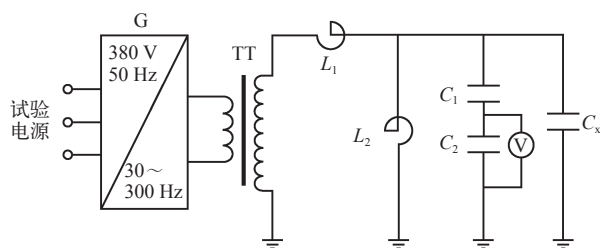


图8 试验接线原理图

Fig. 8 Schematic diagram of test wiring

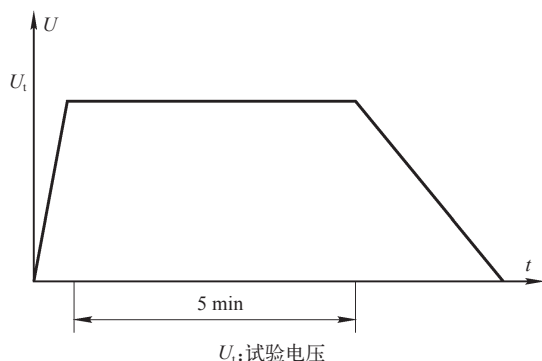


图9 加压程序图

Fig. 9 Pressurization program diagram



图10 试验现场

Fig. 10 Test site

C_x 为被试电缆；G为变频电源。

5 结束语

本文对混联谐振耐压试验方法进行了详细的理论计算，经过推导计算得出串并联谐振各组电抗器之间的关系，给出了混联谐振的频率计算公式和串并联电抗器之间的关系。

对比分析了串联谐振、混联谐振试验方案在不同组合方式下的优缺点，最终选取了最优的

试验方案开展试验。结果表明，在大容量电缆试品试验时，通过改变串并联电抗器之间的组合方式，可扩展现有试验设备的能力。

本次长距离大容量电缆现场交流耐压试验，证实了本文提出的混联谐振耐压试验方案是切实可行的，对今后全面实施推广相关试验具有重要的意义。

参考文献

- [1] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力, 2020(1): 1-9.
- [2] 马宇坤, 张勤杰, 姜晓昌. 海上风电势头正劲 海工装备扬帆起航[J]. 船舶物资与市场, 2019(8): 8-11.
- [3] 宋光辉, 陈涛潘, 文林, 等. 大长度海底电缆XLPE绝缘三层共挤生产线的组建[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2020(1): 27-30.
- [4] 杨世强, 何信林, 雷阳, 等. 发电机汇水管绝缘异常原因分析及处理措施[J]. 电工技术, 2019(21): 144-146.
- [5] 江苏方天电力技术有限公司. 江苏省发电企业电力设备交接和预防性试验规程(试行)[S].
- [6] 杨世强, 何信林, 程帅, 等. 发电机定子绕组高压介质损耗及电容增量试验研究[J]. 电气应用, 2019, 38(11): 35-39.

作者简介



杨世强

杨世强（1990—），男，工学硕士，工程师，主要从事电气设备特殊性试验研究工作。

(收稿日期：2020-03-27)EA