串并联谐振在长距离海缆交流耐压试验中的应用

刘 虹

（上海勘测设计研究院有限公司勘察检测研究院，上海 200434）

摘要：对比分析 CIGRE、IEC、GB（含 GBT）和国家电网电缆交流耐压试验标准，针对长距离海缆电容大的特点，提出现场交流耐压试验系统的多目标优化模型及基于遗传算法的求解流程。结果表明，适当地选择评价指标，试验系统能够以较少的电抗器数量和励磁变压器数量获得较高的品质因数，从而优化试验系统。对试验系统的优化结果进行 PSCAD 仿真，以验证遗传算法的求解结果。

关键词：长距离海缆；交流耐压试验；遗传算法；多目标优化模型；串并联谐振试验系统；品质因数

Application of parallel compensated series resonance in AC voltage test of long-distance submarine cable

LIU Hong

(Survey and Testing Research Institute of Shanghai Investigation and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Comparative analysis of CIGRE, IEC, GB (including GBT) and State Grid on cable AC voltage withstand test standards. According to the large capacitor of long-distance submarine cable, the multi-objective optimization model of the field AC voltage withstand test system and the solution process based on genetic algorithm are proposed. The results show that by selecting the evaluation index appropriately, the test system can reduce the number of reactors and excitation transformers to optimize the test system. The PSCAD simulation of the test system is used to verify the solution results of the genetic algorithm.

Key words: long-distance submarine cable; AC withstand voltage test; genetic algorithm; multi-objective optimization model; series resonance test system with parallel compensation; quality factor

0 引言

为实现碳达峰、碳中和的目标，建设较高比例的绿色综合能源系统是关键。海上风电是现阶段主要的绿色能源之一，与陆上风电相比，海洋风力资源更优越，有利于增大发电机组容量。在风场特性方面，海洋风资源的湍流强度相对较小，可减轻风机疲劳[1]，并且风切变小，因而可以降低风机塔架的建设高度[2]。此外，海上风力发电机组距海岸较远，具有视觉影响小、环境负面影响小以及不占用陆地宝贵的土地资源等优势，因此，开发海洋风电是实现“双碳”目标的重要举措。

海洋风力发电机的互联与集电，以及在海上升压后通过更高电压等级送至电力系统均需采用海底电缆实现[3]，因此海底电缆是海洋风电建设不可或缺的组成部分。主绝缘交流耐压试验是海

缆交接试验的重要环节，文献[4]论述了1 100 kV气体绝缘金属封闭输电线路（GIL）现场交流耐压试验的技术难点，并提出了现场交流耐压试验方案。文献[5]分析了电缆交流耐压试验过程的容升现象，指出试验频率较高时长距离电缆容升电压较为严重。文献[6]介绍了串并联电抗器组合的优选方法。

对于长距离海缆线路的交流耐压试验，由于其电容大，若加载工频电压试验，所需要的电抗器非常多，现场无法提供足够的试验场地。另外，海缆电容电流远超其载流量，将对海缆造成损坏。研究表明[7]，在很宽的频率范围内，绝缘内部各介质的电压分布基本相同，典型缺陷的电缆击穿电压没有明显差别。因此，规程规定在长距离海缆线路交流耐压试验时，可以选择较宽的频率范围（10～300 Hz）。但由于受电抗器容量、电缆载流量和试验场地的限制，试验系统频率往往只能在较小的范围内选择。

1 并联电抗补偿串联谐振交流耐压试验原理

1.1 串联谐振耐压试验原理

图1为串联谐振回路原理图。图1中，R为回路电阻；L为串联电抗器的电感；C为被试品等效电容。电容C两端的电压U_c为

$$U_c=\frac{U_s}{R+\mathrm{j}(\omega L-\frac{1}{\omega C})}\times\frac{1}{\mathrm{j}\omega C} \tag{1}$$

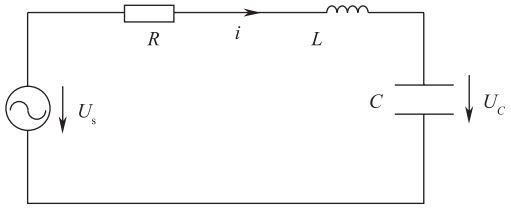

图 1 串联谐振回路原理图

Fig. 1 Schematic of the series resonant circuit

电源频率f满足

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2}$$

由于$\omega_0 L=\frac{1}{\omega_0 C}$，回路阻抗$Z=R+\mathrm{j}\left(\omega_0 L-\frac{1}{\omega_0 C}\right)=R$，回路电流达到最大，即

$$I=I_{\max}=\frac{U_s}{R} \tag{3}$$

此时，RLC回路处于谐振状态，定义

$$Q_s=\frac{U_c}{U_s} \tag{4}$$

式中，Q_s为试验回路的品质因数[8]。

由于试验回路中的R很小，故试验回路的品质因数很大，在大多数正常情况下，Q_s可达50以上，即输出电压是励磁电压的50倍，因此，通过电压较低的试验变压器得到较高的试验电压。

上述串联回路电源频率f_0处于谐振状态，电源除基波f_0外，还包含少量的奇数次谐波。对于频率为nf_0的谐波，试品上的谐波电压为

$$U_c=\frac{U_s}{R+\mathrm{j}\left(n\omega_0 L-\frac{1}{n\omega_0 C}\right)}\times\frac{1}{\mathrm{j}n\omega_0 C} \tag{5}$$

考虑到$\omega_0 L=\frac{1}{\omega_0 C}$及$Q_s=\frac{U_c}{U_s}$，有

$$U_c=\frac{U_s}{\sqrt{\left(\frac{n}{Q_s}\right)^2+(n^2-1)^2}} \tag{6}$$

如上所述，在大多数正常情况下，Q_s可以达到50以上，设Q_s=50，可得各次谐波电压倍数，见表1。

表 1 试品谐波电压倍数

Tab. 1 Harmonic voltage ratio on the test equipment

谐波次数 n	试品电压倍数 U_c/U_s
1	50.000 0
3	0.125 00
5	0.041 67
7	0.020 83
9	0.012 50
11	0.008 33

由于试验时回路处于谐振状态，回路本身具有良好的滤波作用，电源波形中的基波电压在试品两端放大至Q_s倍，而谐波成分在试品两端得到

有效衰减，试品两端获得良好的正弦波形电压。

在串联谐振回路中，当试验回路发生试品被击穿或其他突发状况时，回路由于电感电容量的改变而立即脱离谐振状态，试品两端电压及回路电流自动减小，不会对试验装置或者试品造成损害，同时也提高了试验人员的安全性。

1.2 并联电抗补偿串联谐振交流耐压试验原理

图2为串联谐振交流耐压试验原理接线图。图2中，F_1为变频器；T_1为励磁变压器；L为高压电抗器；C_2为分压电容器；C_x为被试品。对于长电缆耐压试验，由于被试品的电容特别大，按照图2的试验回路在现场难于实现。其主要原因有两点：一是难于找到合适容量的电抗器，保证被试品的试验电压满足相关要求；二是即使电抗器能满足要求，变频器和励磁变压器的容量要求过大，也难以满足现场试验要求。

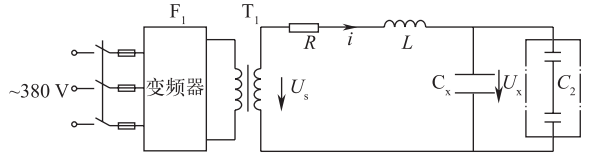

图 2　串联谐振交流耐压试验回路

Fig. 2 Series resonance AC voltage test circuit

采用并联补偿串联谐振交流耐压试验回路，如图3所示。图3中，n_1、n_2分别为串联分支和并联分支的电抗器台数。

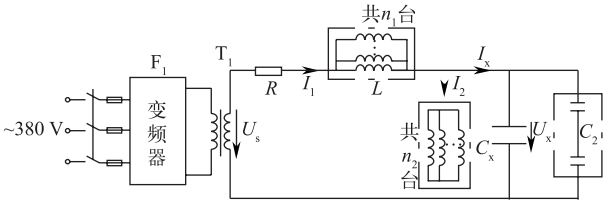

图 3　改进的并联电抗补偿串联谐振交流耐压试验回路

Fig. 3 Improved series resonance AC voltage test circuit with parallel reactance

并联补偿串联谐振回路的谐振频率为f_0，角频率为ω_0，有

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{LC_x}} \tag{7}$$

$$I_x = \mathrm{j}\omega_0 C_x U_x \tag{8}$$

$$I_2 = \frac{n_2 U_x}{\mathrm{j}\omega_0 L} = -\mathrm{j}\frac{n_2 \omega_0 C_x U_x}{n_1 + n_2} \tag{9}$$

$$I_1 = I_2 + I_x = \mathrm{j}\frac{n_1}{n_1 + n_2}\omega_0 C_x U_x \tag{10}$$

适当选择n_1、n_2的值，并联支路可以补偿大部分的电容电流，串联支路的电流大为减小，只需要较小的励磁变压器容量就能满足试验要求。

2 长距离海缆耐压试验系统设计

2.1 高压电缆耐压试验标准试验电压

高压电缆耐压试验目前使用的标准有CIGRE推荐标准、IEC标准、国家标准以及企业标准。根据高压电缆耐压试验标准，可为高压电缆的现场耐压试验提供依据。

CIGRE WG21.09《高压挤包绝缘电力电缆竣工试验建议导则》推荐60～500 kV电缆现场试验使用工频或类似工频（30～300 Hz）的交流电压，具体见表2。

表 2　CIRGE 推荐的电缆试验电压和频率

Tab. 2 Recommend test voltage and frequency for power cable by CIGRE

额定线电压 /kV	推荐的现场试验倍数（相 - 地电压）	试验频率 /Hz	耐压试验时间 /min
60 ～ 115	$2.0U_0$	30 ～ 300	60
220 ～ 230	$1.4U_0$	30 ～ 300	60
275 ～ 345	$1.3U_0$	30 ～ 300	60
380 ～ 400	$1.2U_0$	30 ～ 300	60
500	$1.1U_0$	30 ～ 300	60

IEC规定的电缆试验电压和频率见表3。

表 3　IEC 规定的电缆试验电压和频率

Tab. 3 Recommend test voltage and frequency for power cable by IEC

电压等级 /kV	试验电压	试验频率 /Hz	试验时间 /min
30 ～ 110	$2U_0$	20 ～ 300	60
220	180 kV 或 $1.7U_0$	20 ～ 300	60
330	250 kV 或 $1.7U_0$	20 ～ 300	60
500	320 kV 或 $1.7U_0$	20 ～ 300	60

注：不具备上述试验条件或有特殊规定时，可采用施加U_0、24 h方法代替交流耐压。

国家标准[9-13]也对电缆安装后电气试验电压做了相关规定，详见表4。

表 4 国家标准规定的电缆试验电压

Tab. 4 Cable test voltage specified in the national standard

电压等级 /kV	试验电压	试验频率 /Hz	试验时间 /min
30 ～ 110	$2U_0$	20 ～ 300	60
220	$1.4U_0$ 或 $1.7U_0$	20 ～ 300	60
500	$1.1U_0$ 或 $1.7U_0$	20 ～ 300	60

注：1. 对于大长电缆线路，试验频率为10 ～300 Hz。
2. 不具备上述试验条件或有特殊规定时，可采用施加U_0、24 h方法代替交流耐压。

国家电网公司通过企业标准Q/GDW 11316—2018[14]规定了交联聚乙烯电缆线路交流耐压试验电压，见表5，并规定试验电压频率为10～300 Hz。

表 5 国家电网规定的试验电压

Tab. 5 Cable test voltage specified by State Grid

额定电压 U_0/U	试验电压		时间
kV/kV	新投运线路或不超过3 年的非新投运线路	非新投运线路	min
48/66	$2U_0$	$1.6U_0$	60
64/110			
127/220			
190/330	$1.7U_0$	$1.36U_0$	
290/500			

注：非新投运线路指由于线路切改或故障等原因重新安装电缆附件的电缆线路。对于整相电缆和附件全部更换的线路，试验电压和耐受时间按照新投运线路要求。

综上对比分析可知：对于110 kV高压电力电缆交流耐压试验，各种标准在试验电压和试验时间上无差别；而对于220 kV及以上高压电力电缆交流耐压试验，国家电网企业标准规定采用$1.7U_0$、60 min的耐压试验，IEC标准、国家标准规定试验电压可通过协商的方式采用$1.7U_0$或者$1.4U_0$；CIGRE标准推荐采用$1.4U_0$。

电网企业标准在高压电力电缆交流试验电压上要求更高，IEC、国家标准可采用施加U_0、24 h代替交流耐压试验，国家电网企业标准中无此替代方案。

2.2 试验系统优化流程

假定海缆试验电压为U_x，试验频率为f，被试海缆总电容为C_x，海缆容许载流量为I_{cmax}；高压电抗器额定电流为I_{rm}，电感为L，内阻为R，高压电抗器总台数为n_{total}；励磁变压器额定容量为S_m，高压侧额定电流为I_{tm}，额定电压为U_{tm}，内阻为R_m，励磁变压器总台数为m_{total}，并联台数为m_1，级联台数为m_2。

目标函数

$$\begin{aligned}&\min y=[g_1,g_2,g_3]\\&g_1=U_t\\&g_2=n_1+n_2\\&g_3=m_1+m_2\end{aligned}\tag{11}$$

约束条件

$$\begin{cases}n_1+n_2\leqslant n_{total}\\I_r\leqslant(n_1+n_2)I_{rm}\\I_t\leqslant m_1I_{tm}\\U_t\leqslant m_2U_{tm}\\10\leqslant f\leqslant300\\m_1+m_2\leqslant m_{total}\end{cases}\tag{12}$$

其中

$$\begin{cases}f=\dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{n_1+n_2}{LC_x}}\\I_r=\dfrac{(n_1+n_2)U_x}{2\pi fL}\\I_t=\dfrac{n_1}{n_1+n_2}2\pi fC_xU_x\\U_t=U_x/Q_s\end{cases}\tag{13}$$

式中，Q_s为试验系统品质因数；I_r为流经高压电抗器总电流；I_t为流经励磁变压器总电流；U_t为励磁变压器组合高压侧电压。

试验系统设备参数选择是一个多目标优化模型，传统优化算法包括加权法、约束法和线性规划法等，实质上就是将多目标函数转化为单目标函数，通过采用单目标优化的方法达到对多目标函数求解的目的。

智能优化算法包括遗传算法（Evolutionary Algorithm，EA）、粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法等。

基于遗传算法的试验系统设备优化求解流程

如图4所示。

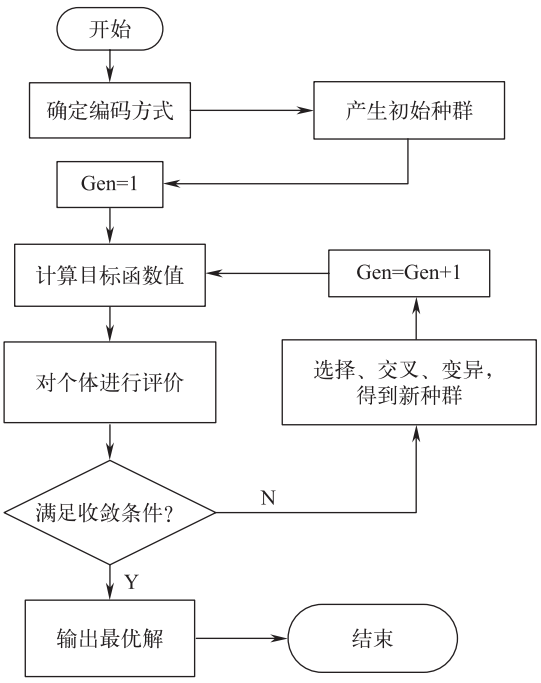

图 4　试验系统优化的流程图

Fig. 4 Flowchart of the test system optimization

3　长距离海缆耐压试验应用实例

3.1　海缆主要参数

以江苏沿海某海上风电场为例，该风电场装机容量300 MW。海上风力发电机端电压0.69 kV，经塔筒内箱式变压器升压至35 kV，然后经35 kV海缆送至220 kV海上升压站，海上升压站设置两台180 MV·A低压侧双分裂绕组的升压变压器，高压侧通过一回86 km型号为HYJQF41-F 127/220 kV-3×1 000+2×48的220 kV海缆送至岸基集控中心。

220 kV海缆主要参数见表6。

表 6　220 kV 海缆主要参数

Tab. 6 Main parameters of 220 kV submarine cable

名称	参数	备注
额定电压 /kV	220	
截面积 /mm^2	1 000	
长度 /km	86	
总电容 /μF	14.364	
容许载流量 /A	788	载流量的最小值，位于海缆登陆后的陆地段

3.2　海缆交流耐压试验系统

3.2.1 交流耐压试验系统主要设备参数

交流耐压试验系统设备主要包括变频电源、励磁变压器、高压电抗器、分压器和通信控制模块等，部分设备参数见表7。

表 7　交流耐压试验设备参数

Tab. 7 Parameters of AC voltage withstand test equipment

设备名称	变频电源	励磁变压器	电抗器
型号	HVFP-450	YD-400	HVDK-25600
主要参数	450 kV·A	2 kV/200 A 4 kV/100 A 20 kV/20 A	320 kV/80 A/26 H
数量	1	2	7

3.2.2 交流耐压试验系统试验参数选择

根据表7的试验设备参数，计算对应串并联电抗器总数的谐振频率、试品电流以及每台电抗器电流，见表8。

表 8　交流耐压试验频率随电抗器数量变化

Tab. 8 The frequency of AC voltage test varies with the number of reactors

电抗器台数 n_1+n_2	谐振频率 f/Hz	试品电流 I_x/A	单台电抗器电流 I_t/A
1	8.236	160.55	160.55
2	11.647	227.05	113.52
3	14.264	278.08	92.69
4	16.471	321.10	80.27
5	18.415	359.00	71.80
6	20.173	393.26	65.54
7	21.789	424.77	60.68
23	39.497	769.96	33.48
24	40.346	786.52	32.77
25	41.178	802.74	32.11
36	49.414	963.29	26.76
37	50.095	976.58	26.39
L=26 H，C_x=14.364 μF，U_x=216 kV			

本项目海缆额定电压220 kV，U_0=127 kV，根据规程试验电压为1.7U_0=216 kV。电抗器数量4台及以下时，单台电抗器试验电流大于额定电流80 A，造成电抗器过载，故电抗器总台数不得小于5台。电抗器数量25台时，海缆试验电流达到802.74 A，超过海缆允许载流量也是不允

许的。

本例中的长距离海缆，其耐压试验频率无法达到工频附近。因为谐振频率在工频附近时，需要的高压电抗器数量高达37个，无论是设备库存还是试验场地都无法满足要求；另一方面，在工频电压耐压试验中，当海缆试验电压达到规程规定的216 kV时，海缆电流高达976.58 A，远超电缆允许载流量。

在实际现场海缆耐压试验中，由于场地和成本限制，电抗器数量不能选择过多，本例中可选5～7台电抗器，能满足规程要求，此时试验频率为18.4～21.789 Hz，可选频率范围较小。

按照前文试验系统优化方法，求解得到本例最优解为n_1=2，n_2=4，m_1=2，m_2=1，Q_s=92.05，系统谐振频率f=20.173 Hz。

3.3 试验系统仿真分析

3.3.1 交流耐压试验系统模型

利用PSCAD仿真软件，对优化试验系统进行仿真，仿真模型如图5所示。系统谐振频率为20.173 Hz。

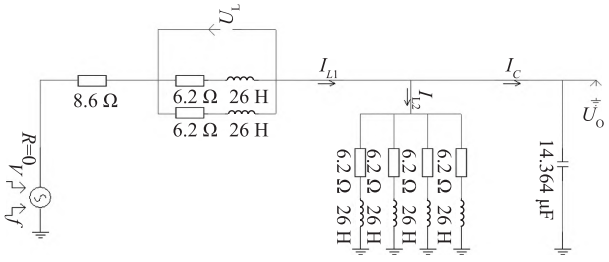

图 5 试验系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of the test system

3.3.2 试验系统仿真结果

为了验证试验系统的结果，本文对采用6台电抗器各种组合进行了仿真，仿真结果如图6所示，试验系统品质因数见表9。

从表9可以看出，n_1、n_2不同组合，不仅影响品质因数值，还影响并联分流电流大小，从而影响励磁变压器的二次电压和电流选择。

从仿真结果可以看出，选6台电抗器，n_1=2、n_2=4时试验系统可以获得较高的品质因数，此时，需要两台励磁变压器并联才能满足试验系统要求。若调整优化评价函数，也可能最优解为n_1=1、n_2=5，此时虽然损失一些品质因数，但励磁变压器只需要一台，可以减少运输设备。当n_1=3、n_2=3时，虽不是最优解，但也是可行解。当n_1=4、n_2=2或n_1=5、n_2=1时，需要的励磁变压器超出库存数量，由于受约束条件限制，不会出现在解集中。

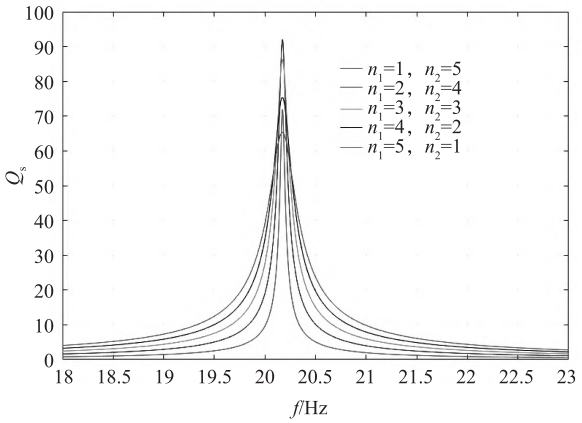

图 6 试验系统品质因数仿真结果（n=6）

Fig. 6 Simulation results of the quality factors of the test system (n=6)

表 9 试验系统品质因数 (n=6)

Tab. 9 Quality factors of the test system (n=6)

n_1	n_2	f	I_{L1}	I_{L2}	I_C	m_1	m_2	Q
1	5	20.173	65.55	327.72	393.26	1	1	71.95
2	4	20.173	131.09	262.18	393.26	2	1	92.05
3	3	20.173	196.63	196.63	393.26	2	1	86.27
4	2	20.172	262.15	131.09	393.24	3	1	75.41
5	1	20.172	327.69	65.55	393.24	4	1	65.34

电抗器组合n_1=2、n_2=4时，试品两端的电压及串联电抗器两端电压波形如图7所示。

海缆试验电流、串联电抗器电流和并联补偿电抗器电流波形如图8所示。

3.4 海缆试验现场及试验过程的加压程序

某海上风电场海缆耐压试验现场如图9所示。

在海缆现场交流耐压试验中，首先在较低的电压输出时，调节变频器输出频率，使系统

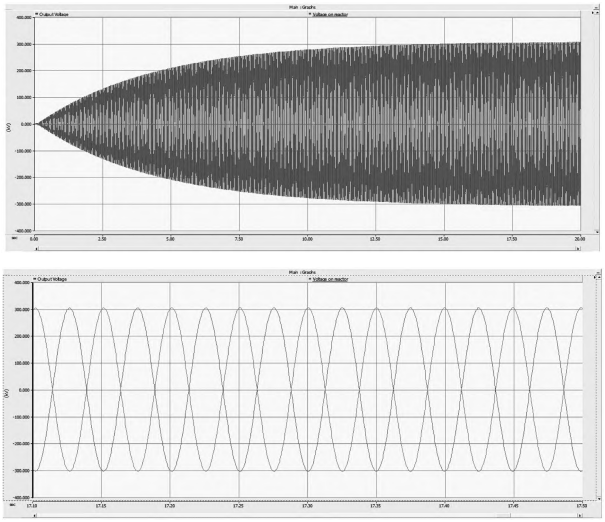

图 7　试验系统电压波形 (n_1=2、n_2=4)

Fig. 7 Output voltage of the test system (n_1=2，n_2=4)

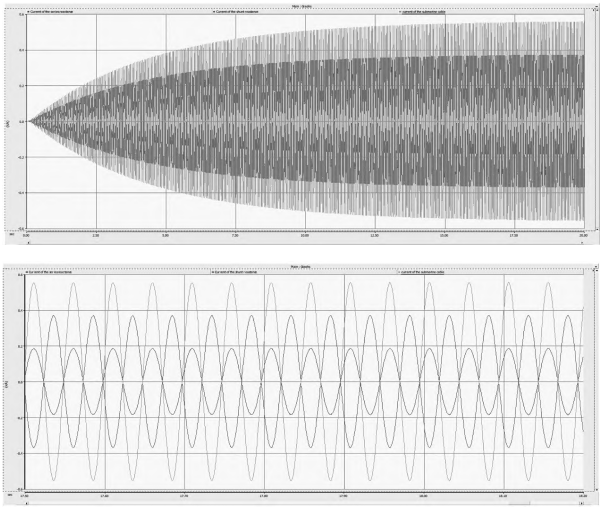

图 8　试验系统电流波形 (n_1=2、n_2=4)

Fig. 8 The current waveform of the test system (n_1=2，n_2=4)

图 9　海缆耐压试验现场

Fig. 9 Submarine cable AC-voltage withstand test site

达到谐振状态。然后缓慢升压，当试品电压达到0.5U_0时，停留2 min；再进一步缓慢升压，试品电压达到U_0时，停留1 min；然后再进一步缓慢升压，直到试品电压达到1.7U_0，保持60 min。试验完毕，均匀、快速降压后，切断电源。整个加压程序如图10所示。

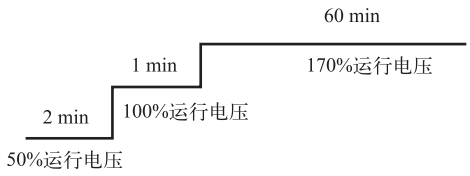

图 10　海缆试验过程的加压程序

Fig. 10 Voltage loading procedure for marine cable test

4　结束语

通过对不同高压电缆耐压试验标准进行比较，以及对串并联谐振交流耐压进行分析与仿真，得到以下结论：

1）对于110 kV高压电力电缆交流耐压试验，各种标准在试验电压和试验时间上无差别；而对于220 kV及以上高压电力电缆交流耐压试验，国家电网企业标准规定采用1.7U_0、60 min的耐压试验，IEC标准、国家标准规定试验电压可通过协商的方式采用1.7U_0或者1.4U_0；CIGRE标准推荐采用1.4U_0。

2）高压电力电缆交流耐压试验的频率要求CIGRE标准为30～300 Hz；IEC和国家标准为20～300 Hz；但对长距离电缆，试验频率为10～300 Hz，国家电网为10～300 Hz。

3）长距离海缆交流耐压试验宜选择较低的试验频率，以免使用过多的高压电抗器，同时避免电缆过载。

4）利用串并联谐振的交流耐压试验系统，应对串联电抗器数n_1和并联补偿电抗器数n_2做适当优化，以获得较高的品质因数，并可选择较小容量的变频器和励磁变压器。

参考文献

[1]　迟永宁，梁伟，张占奎，等．大规模海上风电输

电与并网关键技术研究综述[J]．中国电机工程学报，2016，36(14)：3758-3770．

[2] 黄玲玲，曹家麟，张开华，等．海上风电机组运行维护现状研究与展望[J]．中国电机工程学报，2016，36(3)：729-738．

[3] 鲁加明，赵云，郑明，等．无功配置对海上风电场输出海缆损耗的影响分析[J]．电力建设，2015，36(6)：114-118．

[4] 刘泽洪，韩先才，等．长距离、大容量特高压GIL 现场交流耐压试验技术[J]．高电压技术，2020，46(12)：2172-4181．

[5] 戚革庆，吴建军，等．高压电力电缆在交流耐压过程中的容升现象研究[J]．高压电器，2016，52(8)：155-160．

[6] 徐妍，孙凯，储海军，等．长电缆耐压试验中电抗器串并联组合的优选方法[J]．高压电器，2020，56(3)：240-245．

[7] 朱占巍，关首峰，等．长距离500 kV电缆线路交接试验研究及应用[J]．电网与清洁能源，2016，32 (3)：78-86．

[8] 国家能源局．现场绝缘试验实施导则交流耐压试验：DL/T 474．4—2018[S]．2018．

[9] 额定电压110 kV(U_m=126 kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第1部分：试验方法和要求：GB/T 11017．1—2014[S]．2014．

[10] 额定电压220 kV(U_m=252 kV)交联聚乙烯电力电缆及其附件 第1部分：试验方法和要求：GB/T 18890．1—2015[S]．2015．

[11] 额定电压220 kV(U_m=252 kV)交联聚乙烯绝缘大长度交流海底电缆及附件 第1部分：试验方法和要求：GB/T 32346．1—2015[S]．2015．

[12] 额定电压500 kV(U_m=550 kV)交联聚乙烯电力电缆及其附件 第1部分：试验方法和要求：GB/T 22078．1—2008[S]．2008．

[13] 住建部．电气装置安装工程电气设备交接试验标准：GB 50150—2016[S]．2016．

[14] 国家电网有限公司．高压电缆线路试验规程：Q/GDW 11316—2018[S]．2018．

作者简介

作者：刘虹（1972—），女，工程师，主要从事电气设计及电气试验工作。

（收稿日期：2023-04-12）