交流送出海上风电场无功配置方案

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：长距离高电压交流海缆送出的风电场接入系统，巨大的海缆充电功率可能导致海缆沿线电压电流波动较大，造成海缆电压越限和过载。在建立海上风电场等值模型的基础上，依据计算海上风电场送出系统在各种工况下无功需求，确定高压电抗器和 SVG 补偿容量。然后依据并网点电压波动，以并网点无功交换为零为约束条件，计算高压海缆沿线电流分布。鉴于海缆允许的载流量随海缆的敷设方式和敷设环境条件变化，提出依据高压海缆沿线的电流最佳分布确定高压电抗器容量在海上升压站和岸基集控中心分配的方法。文案法应用于某海上风电场的规划设计中，该风电场现已投入使用，其运行情况良好，实践说明提出的无功配置方法是可行有效的。

关键词：海上风电送出系统，海上风电场，无功配置，海缆载流量

Reactive power configuration of offshore wind farm transmission system via AC submarine cable

LIU Hong

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

Abstract: When a wind farm is connected to the system with a long-distance high-voltage AC submarine cable, the huge reactive charging power of the submarine cable may cause large voltage and current fluctuations along the submarine cable, and may cause the submarine cable to overload and exceed the voltage limit. On the basis of establishing the equivalent model of the offshore wind farm, the compensation capacity of the high-voltage reactor and SVG is determined according to the calculation of the reactive power demand of the sending system of the offshore wind farm under various working conditions. Then, according to the voltage fluctuation of the grid connection point, and the reactive power exchange of the grid connection point is zero as the constraint condition, the current distribution along the high-voltage submarine cable is calculated. Since the current limit of the submarine cable varies with the laying method and environmental conditions of the submarine cable, the distribution of the high-voltage reactor capacity in the offshore booster station and the onshore centralized control center is determined according to the optimal current distribution along the high-voltage submarine cable. The method is applied to the planning and design of an offshore wind farm. The wind farm has been put into use and its operation is good. The practice shows that the reactive power allocation method proposed is feasible and effective.

Key words: offshore wind power transmission system; offshore wind farm; reactive power configuration; submarine cable carrying capacity

0 引言

随着我国绿色能源发展战略的实施，清洁能源建设迎来了发展的春天。与陆上风电相比，海上风电具有风能资源丰富、风速较稳定、单机容量大和年利用小时数高的特点。此外，海上风力发电机组距海岸较远，具有视觉影响小、环境负面影响小和不占用陆地宝贵的土地等优势。近年来，海上风电发展迅猛，截至2020年底，全国全口径并网风电2.8亿kW，其中海上风电装机899万kW[1]。加快发展海上风电是我国应对能源革命、坚持绿色低碳及非化石能源规模化发展的重要举措。

纵览海上风电场交流并网涉及的无功规划和配置相关研究，文献[2]提出对于交流海缆送出的海上风电场，当高压海缆较长时，采用海缆首末两端无功补偿时电能损耗更低，但未对海缆首末端补偿容量进行优化；文献[3]提出考虑工频过电压和风电场无功需求的无功配置方案；文献[4]分析了海缆近风电场侧的无功功率对最大传输容量的影响；文献[5-6]对在线路末端或中间所需的并联补偿量及其位置进行了分析评估，提出了输电网络中超高压交流电缆线路末端和中间并联补偿要求。由于海缆在海底段、登陆段和陆地段的敷设环境不同，海缆的容许载流量并不相同。此外，在海缆运行时由于海缆的充电功率较大，海缆沿线的电流分布呈显著变化，实际工程设计中尚需分析无功补偿配置对海缆沿线电流影响。

本文根据风电场接入电力系统技术规定[7]，提出一种大型海上风电场无功配置的方法。该方法首先依据并网点电压在0.97～1.07（pu）波动下，风力发电机从空载至满载变化时，风电场送出系统的无功需求，确定高压电抗器和SVG容量；其次，依据各工况下高压海底电缆的沿线电流分布，确定高压电抗器容量在海上升压站和岸基集控中心的分配。

1 海上风电交流送出系统仿真模型

1.1 海上风电场交流送出系统结构

采用长距离交流电缆送出的海上风电场送出系统，一般是风电机组经塔筒内箱式变压器升压至35 kV，分成若干组由35 kV汇集海缆送至海上升压站，经海上升压变压器升压至220 kV，经220 kV海缆送至岸基集控中心，再通过架空输电线路连接到系统站的并网点。并网电压可以是220 kV或500 kV，视集控中心是220 kV开关站还是500 kV升压变电站而定。

在规划设计阶段，可以将风力机、35 kV升压变和35 kV海缆简化等效，等效后的系统结构如图1所示。

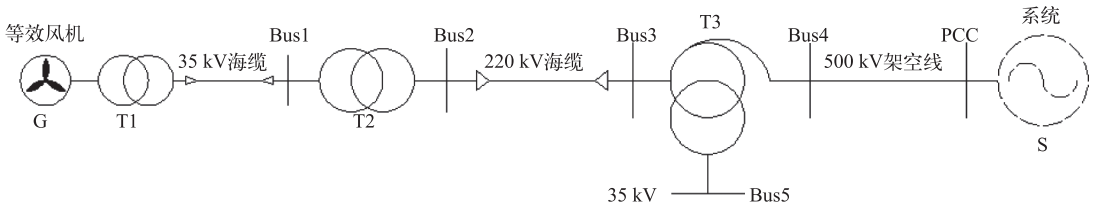

图 1 海上风电场接入系统结构

Fig. 1 Electrical system of offshore wind farm network

1.2 风力机及35 kV系统参数等值

在规划设计阶段，尽管风力机可以运行在功率因数－0.95～0.95范围内，有一定的无功调节能力，考虑到35 kV变压器、35 kV海缆的电力计算参数存在误差，为保证系统安全运行，也为了风力机在风力充足时发出更多的有功功率，潮流分析时风力机按功率因数为1运行，即不考虑风力机的无功调节，即

$$P_{\mathrm{Geq}}=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}P_{ij} \tag{1}$$

式中，P_{Geq}为等效风力机有功出力；M为35 kV海缆的回路数；N_i为回路i的风力机台数；P_{ij}为回路i第j台风力机的有功出力。

当系统稳态运行时，可以认为系统各节点电压保持不变，且所有风力机、35 kV升压变压器的运行电压非常接近，这样可以将各设备等效电路中所有对地并联支路的电导求和，即

$$B_{Teq}=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}B_{Tij} \tag{2}$$

$$B_{Ceq}=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}B_{Cij} \tag{3}$$

式中，B_{Teq}、B_{Ceq}分别为等效变压器和海缆电纳；B_{Tij}为回路i第j台变压器电纳；B_{Cij}为回路i第j段35 kV海缆电纳。

35 kV箱式变压器的等效容量为所有箱式变压器容量之和。令S_{Tij}为第i回路第j台箱式变压器容量，S_{Teq}为等效箱式变压器容量，则有

$$S_{Teq}=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}S_{Tij} \tag{4}$$

等效变压器的电阻和电抗分别为

$$R_{Teq}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}S_{Tij}^2R_{Tij}}{S_{Tep}^2} \tag{5}$$

$$X_{Teq}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}S_{Tij}^2X_{Tij}}{S_{Tep}^2} \tag{6}$$

式中，R_{Tij}、X_{Tij}分别为第i回路第j台箱式变压器的电阻和电抗。

等效35 kV海缆的电阻和电抗分别为

$$R_{Ceq}=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}a_{Cij}^2R_{Cij} \tag{7}$$

$$X_{Ceq}=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}a_{Cij}^2X_{Cij} \tag{8}$$

式中，$\alpha_{Cij}=S_{Cij}/S_{Teq}$为第$i$回路第$j$段电缆的负载分配系数；$S_{Cij}$为通过该段电缆的变电容量；$R_{Cij}$、$X_{Cij}$分别为第$i$回路第$j$段电缆的电阻和电抗。

类似地，可以对220 kV海上升压站两台升压变压器进行等效。

2 无功补偿装置的配置

2.1 无功配置原则

根据风电场接入电力系统技术规定[7]要求，对于通过220 kV风电汇集系统升压至500 kV电压等级接入公共电网的风电场，其配置的容性无功容量能够补偿风电场满发时场内汇集线路、主变压器的感性无功及风电场送出线路的全部感性无功之和，其配置的感性无功容量能够补偿风电场自身的容性充电无功功率及风电场送出线路的全部容性充电无功功率。风电场电压控制的目标为：当公共电网电压处于正常范围内时，风电场应当能够控制风电场并网点电压在标称电压的97%～107%的范围内。

海缆的对地电容比架空线的对地电容高一个数量级，因而长距离高压交流海缆充电功率特别大。随着远海风电场的开发，海缆长度不断增加，在风力机负荷率低时，风场接入系统的充电功率大量盈余，仅靠风力机组所发无功无法实现无功就地平衡，需要对海上风电场接入系统进行无功补偿配置，以满足风电场运行中的无功就地平衡、工频过电压控制以及无功电压控制的要求。

在进行无功配置时，应该在技术上满足要求的前提下，配置方案最为经济作为最终方案。考虑到在海上搭建平台费用较高，从风电场送出系统的经济性出发，应该尽可能在陆上进行集中无功补偿。当风电场容量较小以及海缆较短时，需要补偿的海上风电场及其接入系统的无功较小，不至于发生由于海缆充电无功引起海缆过电流，此时只须在岸基加装无功补偿装置。当风电场容量较大或海缆较长时，送出系统的无功波动较大，或海缆产生的无功过大，仅在岸基加装无功补偿装置不能满足海缆各点的电流和电压不越线。此时，需要在岸基和海上升压站分别安装无功补偿装置，甚至为了改善海缆的电流分布，需要在海缆中段加装无功补偿装置。

2.2 无功配置确定

海上风电场送出系统的无功补偿装置通常有

高压并联电抗器、静止无功发生器（SVG）和低压并联电抗器。

考虑到高压电抗器的造价较SVG低，且高压电抗器的运行可靠性较SVG高，因此，在无功配置时应优先选用高压电抗器。由于SVG装置既可以发出无功也可以吸收无功，为了充分利用SVG装置的容量，在所有计算工况下，风电场送出系统所需SVG发出的最大无功功率与吸收的最大无功功率应相等或尽可能接近，此时，装设的SVG容量最小。定义$Q_{\mathrm{svg+.max}}$、$Q_{\mathrm{svg-.max}}$分别表示计算工况下所需的SVG发出的最大无功功率与吸收的最大无功功率，则应满足

$$\left\|Q_{\mathrm{svg+max}}\right|-\left|Q_{\mathrm{svg-max}}\right\|<\varepsilon \tag{9}$$

高抗容量和SVG容量的确定流程如图2所示。

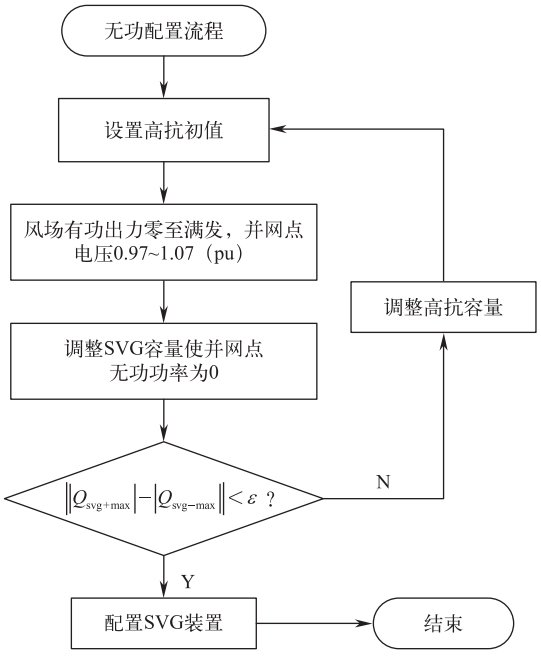

图 2　无功配置流程图

Fig. 2 Flowchart of reactive power compensation configuration

在确定高压电抗器的容量后，需要在海上升压站和岸基集控中心进行容量分配。其分配原则是高压海缆沿线的电压电流在允许范围内，且应考虑海缆登陆后在海滩、过海堤和在陆地段由于海缆敷设方式不同允许的载流量变化。

图3为高抗分配流程图。在高抗容量分配的过程中，需要计算各种工况下的系统潮流分布。潮流计算的系统图为在图1的基础上，Bus 2、Bus3接入高抗，Bus5接入SVG构成。并网点PCC为电网系统，按平衡节点处理，其运行电压0.97～1.07（pu）；Bus5接SVG装置，按PQ节点处理；等效风力机按PQ节点处理。根据2.1节所述，海上风电场送出系统装设无功补偿装之后，其并网点处的功率因数为1，即与系统的无功功率交换为零。因此，潮流计算时需要调整SVG无功输出，以保证PCC点无功交换Q_{PCC}为零。

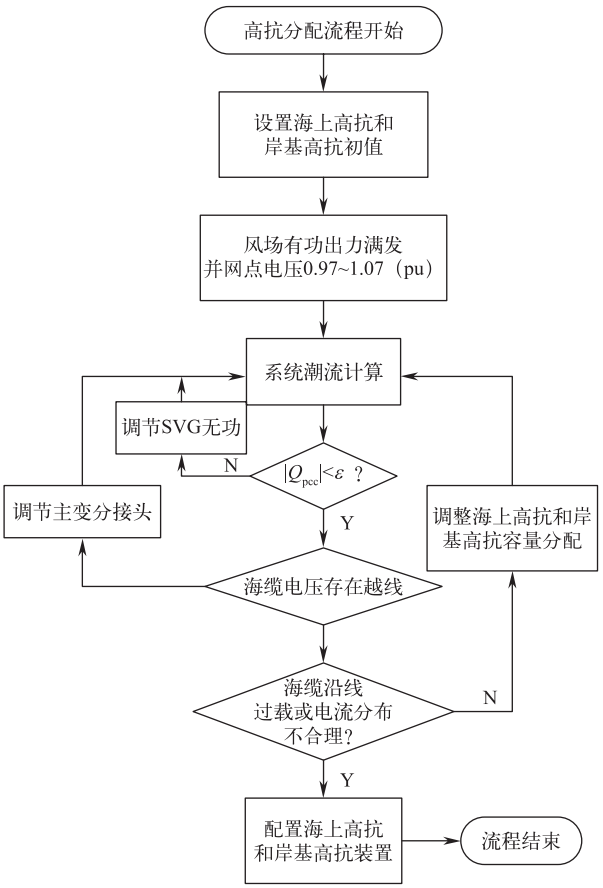

图 3　高抗容量分配流程

Fig. 3 Flow chart of capacity allocation of high-voltage reactors

3　实例仿真计算

3.1　海上风电场概况

以江苏沿海某海上风电场为例，该风电场分别安装4.5 MW风力机38台和6.45 MW风力机20

台，风场装机容量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3×1 000 mm^{2}的220 kV海缆送至岸基集控中心，在岸基集控中心通过一台360 MV·A变压器升压至500 kV，通过一回 500 kV架空线送至系统站。

3.2 风电场设备参数

该风电场风力机有4.5 MW和6.45 MW两种规格，对应的35 kV箱式变压器参数见表1。

表 1 35 kV 箱变参数

Tab. 1 Parameters of 35 kV compact transformer

序号	风力机容量/MW	变压器容量/MV·A	变压器短路电压(%)
1	4.50	5.00	7.75
2	6.45	7.10	7.50

该风电场35 kV海缆均采用三芯结构，海缆截面积有3×70 mm^2、3×120 mm^2、3×185 mm^2、3×240 mm^2、3×300 mm^{2}和3×400 mm^2，包含6种截面积的海底电缆。220 kV海缆也是三芯电缆，型号是HYJQF41-3×1 000，220 kV海缆全长86.1 km。本工程所用各种规格的海缆主要电气参数见表2。

表 2 海缆电气参数

Tab. 2 Electrical parameters of submarine cable

海缆规格	海缆电阻/（Ω/km）	海缆电抗/（Ω/km）	对地电容/（μF/km）	对地电纳（1×10^{-6} s/km）	备注
3×70	0.342	0.171	0.127	39.898 2	35 kV海缆
3×120	0.195 6	0.158	0.147 9	46.464 2	35 kV海缆
3×185	0.127 3	0.148	0.167 8	52.715 9	35 kV海缆
3×240	0.094 71	0.142	0.183 1	57.522 6	35 kV海缆
3×300	0.078 29	0.137	0.196 3	61.669 5	35 kV海缆
3×400	0.062 12	0.133	0.213 9	67.198 7	35 kV海缆
3×1 000	0.046 14	0.127 13	0.1827 7	57.419 6	220 kV海缆

220 kV升压变压器和500 kV主变压器主要电气参数分别见表3和表4。

表 3 220 kV 主变压器参数

Tab. 3 Parameters of 220 kV main transformer

容量/MW	短路损耗/kW	短路阻抗%	空载损耗/kW	空载电流I_0（%）
180	457.32	13.96	65.21	0.09

表 4 500 kV 主变压器参数

Tab. 4 Parameters of 500 kV main transformer

容量/MV·A	短路损耗/kW		短路阻抗%		空载损耗/kW	空载电流I_0（%）
360	高 - 中	495.73	高 - 中	12.02	111.08	0.06
	高 - 低	401.66	高 - 低	34.04		
	中 - 低	432.41	中 - 低	19.77		

220 kV海缆选用HYJQF41-3×1 000，其容许载流量随海缆敷设环境而变，详细见表5。

表 5 三芯 1 000 mm^2 220 kV 海缆载流量

Tab. 5 Current-carrying capacity of three-core 1 000 mm^2 220 kV submarine cable

电缆安装环境	载流量/A
空气中，环境温度为 40 ℃	1 008
电缆沟中，环境温度为 45 ℃	826
J 形管 (通风) 中，环境温度为 40 ℃	933
海底埋深 2.5 m，温度 20 ℃	862
登陆段滩涂埋深 2 m，温度 30 ℃，热阻 1.0	791
陆地段埋深 1.5 m，温度 30 ℃，热阻 1.2	788

3.3 仿真计算结果

3.3.1 高压电抗器和 SVG 容量确定

以并网点PCC与系统的无功交换为零作为约束条件，给定高压电抗器容量初值，通过潮流计算得到并网点电压在0.97～1.07（pu）波动，风电机组出力从零至满载变化时，所需要的SVG容量。根据图2的无功配置流程，采用MATLAB对江苏某海上风电场（系统结构见图1，系统电气参数见3.2节）进行了仿真计算，表6列出部分计算结果，表中β为风力机负载系数。β=0，代表无风情况，此时风力机不发电；β=1代表风力机满发。V_{pcc}为并网点PCC的系统电压，Q_{svg}为保证风电场送出系统在PCC点与电网交换无功为零时，Bus5所需SVG提供的无功补偿容量。Q_{svg}>0表示SVG发

出感性无功；Q_{svg}<0表示SVG吸收感性无功。

表 6　不同高抗容量下所需的 SVG 容量

Tab. 6 SVG capacity required under different high-voltage reactor capacities

高抗配置方案	高抗容量/Mvar	风力机负载系数	V_{pcc}（pu）	Q_{svg}/Mvar
方案 1	200	β=1	1.07	14.53
			0.97	50.40
		β=0	1.07	− 75.33
			0.97	− 61.90
方案 2	210	β=1	1.07	26.02
			0.97	60.47
		β=0	1.07	− 65.00
			0.97	− 53.43
方案 3	220	β=1	1.07	37.86
			0.97	70.33
		β=0	1.07	− 54.53
			0.97	− 44.68
方案 4	230	β=1	1.07	62.33
			0.97	91.88
		β=0	1.07	− 32.96
			0.97	− 26.98

从表6结果可以看出，方案1高抗容量偏小，为满足GB /T 9963—2011无功要求，在风电场无风即风力机无出力(β=0)，且并网点电压较高（V_{PCC}=1.07 pu）时需要SVG吸收的无功较大，导致需要配置的SVG容量较大，从而使得风电场建造成本上升；方案3和方案4高抗容量偏大，在风力发电机满载（β=1），且并网点电压较低（V_{PCC}=0.97pu）时需要SVG发出的无功功率较大，也将导致需要配置的SVG容量较大，从而使得风电场建造成本上升；本案例中方案2即高压电抗器容量配置210 Mvar较合理，此时SVG在风力机满出力，并网点电压处于下限时发出的无功与SVG在风力机零出力且并网点电压处于上限时吸收的无功较为接近，需要配置的SVG容量最小，风电场建造成本最低。

本工程包含海缆和架空线的送出系统在额定电压下的充电功率约266 Mvar，高抗容量210 Mvar，约占送出系统充电功率的78.9%。

考虑到SVG运行备用，最终选择两组+/－60 Mvar的SVG安装在岸基集控中心35 kV侧母线。210 Mvar的高压电抗器安装位置需要进一步分析，以确定海上升压站、岸基集控中心的安装容量，甚至有必要的话需要在海缆中段设置高抗站。

3.3.2 高压电抗器容量分配

依据图3的高抗分配流程，利用MATLAB进行了仿真计算。限于文章篇幅，图5仅绘制了并网点电压V_{PCC}=1.05（pu）时高抗容量在海缆首端和末端不同的分配情况下，220 kV海缆沿线电压电流分布。图5中Q_1为海缆首端即海上升压站高抗容量，Q_2为海缆末端即岸基集控中心高抗容量。

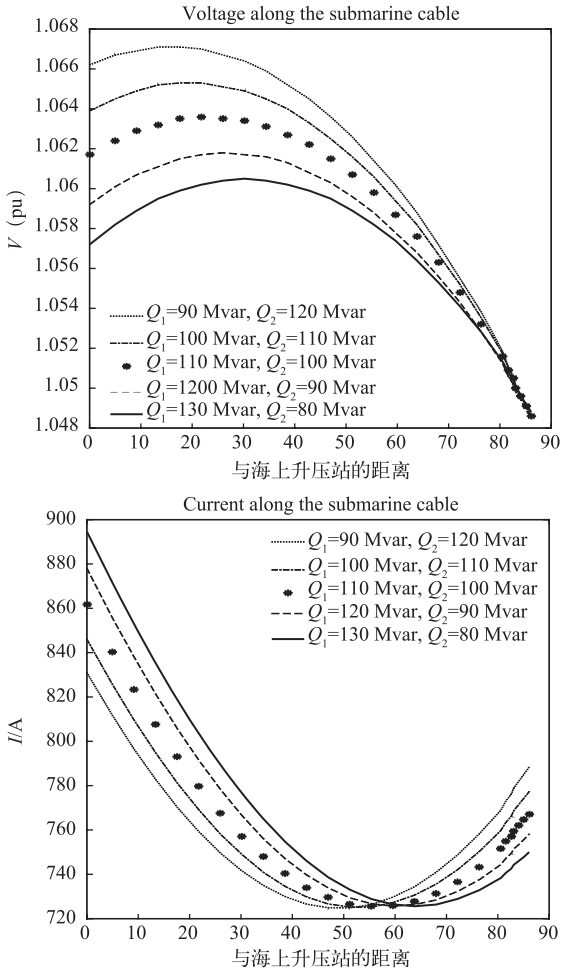

图 5　海缆首末端不同高压电抗器容量配置时海缆沿线电压、电流

Fig. 5 Voltage and current along the submarine cable with different high-voltage reactor capacity configurations at the beginning and end of the submarine cable

海缆的电流电压随高抗配置方案和海缆测点变化，表7列出了不同高抗配置方案下，流经海

缆首末端的电流。对照表5海缆容许载流量，很显然方案1海缆末端(近岸基集控中心的陆地段海缆)电流超出容许载流量，方案4和方案5海缆首端电流超出容许载流量。虽然方案2和方案3均未发生海缆过电流的情况，但是基于下列两个原因：一是方案2的海缆载流量裕度较方案3大；二是由于海上升压站的造价较岸基集控中心高，选择方案时应尽量减小海上升压站的设备容量。因此，最终选择方案2作为本工程的设计方案。即高抗总容量210 Mvar在海上升压站和岸基集控中心分别配置100 Mvar和110 Mvar高抗。

表 7　不同高抗配置方案时 220 kV 海缆首末端电流

Tab. 7 Current at the head and end of 220 kV submarine cable with different high-voltage reactor configuration schemes

配置方案	高抗配置 /Mvar		SVG 配置 /Mvar	SVG 无功输出 /Mvar	海缆电流 /A	
	海缆首端	海缆末端			海缆首端	海缆末端
方案 1	90	120	2×(±60)	34.87	830.95	788.39
方案 2	100	110	2×(±60)	35.79	846.05	777.30
方案 3	110	100	2×(±60)	36.70	861.69	767.20
方案 4	120	90	2×(±60)	37.03	878.06	758.18
方案 5	130	80	2×(±60)	38.44	894.61	750.03

3.3.3 220 kV 海缆电流分布

针对前述确定的SVG和高抗补偿方案，进一步分析风力机不同的出力情况（β=0～1.0）下海缆沿线电流分布，利用MATLAB绘制海缆电流分布曲线，结果如图6所示。

从图6可以看出，在主变压器分接头保持不变、风力发电机相同出力下，并网点电压V_{PCC}越高，海缆电流越小。

进一步分析图6a，在风电场无风时，220 kV海缆沿线电流分布呈一条折线。由于在海上升压站的高压侧设置了100 Mvar的高压电抗器，海缆首端流过较大的感性电流。随着海缆的容性充电电流的积累，海缆电流逐渐变小，在海缆中间某点海缆的容性电流和感性电流完全抵消，流经海缆该处的电流为零。随着海缆容性电流的进一步积累，流经海缆的容性电流逐渐增大，并于海缆末端达到最大值。

在风力发电机负载系数β不为零时，海缆电流呈凹形曲线，海缆首末端电流较大，海缆中间某点感性电流和容性电流抵消，仅含阻性电流，海缆在该处功率因数为1，电流最小。

当风力机负载系数较大，如满发（β=1.0）时，若并网点电压较低，220 kV海缆首末端均出现过载（见图6d，V_{pcc}=1.0 pu和V_{pcc}=0.97 pu）。此时，为保证海缆不过载，需要适当的调节变压器分接头，提高海缆运行电压，降低海缆电流，图7为调节分接头后的海缆电流分布。

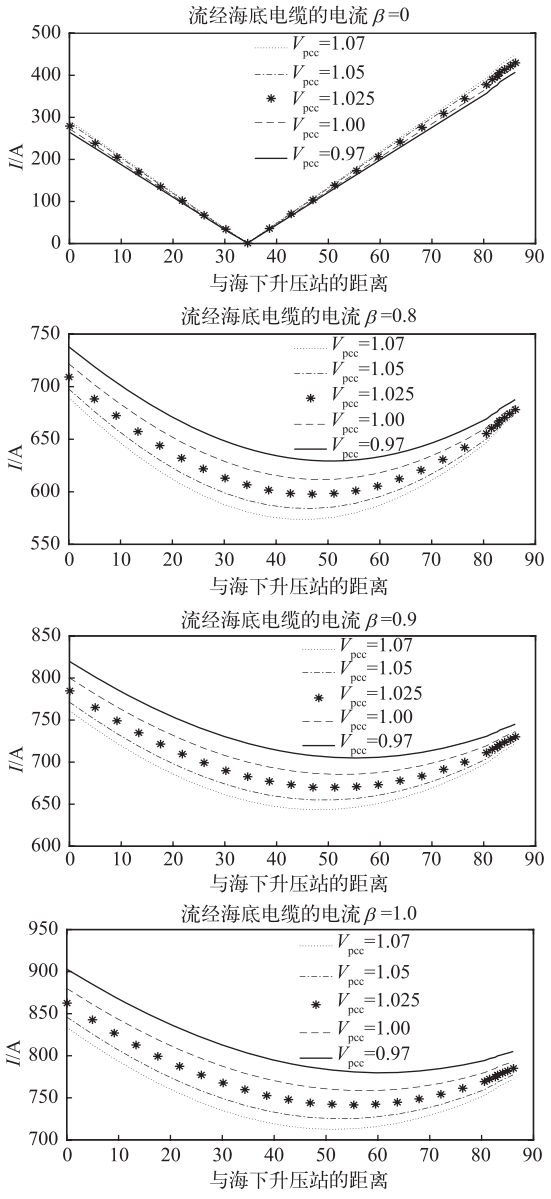

图 6　不同风力机出力情况（β=0 ～ 1.0）下海缆沿线电流分布

Fig. 6 Current distribution along submarine cables with different wind farm load factors (β=0 ～ 1.0)

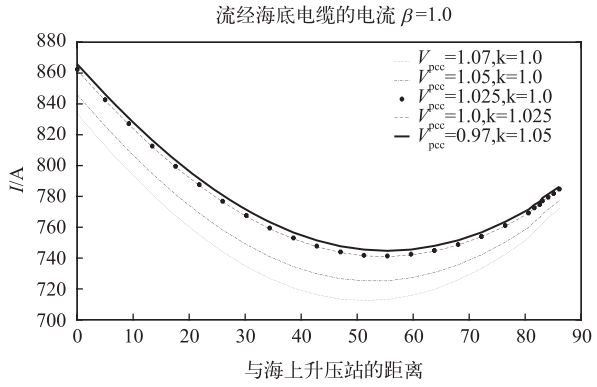

图 7　主变压器分接头调整后海缆沿线电流分布

Fig. 7 The current distribution of the submarine cable after the adjustment of the main transformer tap.

4　结束语

本文以江苏沿海某海上风电场送出系统为例，对风电场高压海缆送出系统的无功补偿进行规划设计，分析风力机不同出力下海缆沿线电流分布，得到以下结论：

1）针对采用220 kV高压电抗器和35 kV中压SVG进行无功补偿的交流并网海上风电接入系统，当并网点电压达上限，且风力发电机组零出力时，为满足并网点功率因数为1的要求，此时需要SVG吸收的无功功率最大；当并网点电压达下限，且风力发电机组满发时，为满足并网点功率因数为1的要求，此时需要SVG发出的无功功率最大。上述两种工况下，SVG吸收的最大无功功率与发出的最大无功功率相等或接近相等时，风电场送出系统无功补偿所需配置的SVG容量最小，系统无功配置最为经济合理。

2）长距离交流海缆送出系统，需要在海缆首末端均配置高压电抗器补偿。鉴于海缆登陆段和陆地段的容许载流量较小，在高压电抗器容量分配时，应使海缆首末端电流与其容许载流量匹配，并保留一定的裕度，以保证海缆安全运行。

3）当风力机负载率高甚至满发时，若并网点电压较低，可以通过调节主变压器分接头电压适当提高海缆运行电压，以减小海缆电流，保证海缆不过载运行，同时可以减少送出系统的有功损耗。

参考文献

[1] 彭穗，等．海上风电场输电方式研究[J]．电力勘测设计，2021(11)：68-75．

[2] 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．

[3] 陈柏超，罗璇瑶，袁佳歆，等．考虑工频过电压的海上风电场无功配置方案研究[J]．电测与仪表，2018，55(13)：85-90．

[4] 张金辉，江岳文．提高海缆输送容量的无功补偿策略[J]．电气技术，2019(5)：19-23.

[5] GATTA F M, GERI A, LAURIA S, et al．Steady-state operating conditions of very long EHVAC cable lines[J]．Electric Power Systems Research，2011，81(7)：1525-1533.

[6] GATTA F M, GERI A, LAURIA S, et al．Steady-state operating conditions of very long EHVAC cable lines two：case studies[J]．Electric Power Systems Research，2012，83(1)：160-169.

[7] 国家质量监督检验检疫总局．风电场接入电力系统技术规定：GB /T 9963—2011[S]．北京：中国标准出版社，2011．

作者简介

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：2022-04-08）