

海上油气田群岸电无功补偿优化设计

万光芬, 魏 澈, 刘国锋, 胡意茹

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 基于岸电应用工程系统架构及关键设备参数, 分析了岸电工程各环节无功组成。不同于海上风电的高压海缆仅连接海上风场与陆地电网, 海上油田群岸电工程增加了一根油田群间的互联海缆, 使单一海缆的无功补偿问题变成海缆组合的无功补偿问题, 无功补偿方案较海上风电更加复杂, 配置难度大大增加。研究适用于海上油田群岸电工程的无功补偿配置方案, 并总结出适用于工程应用的固定无功补偿及动态无功补偿容量的推荐算法, 通过 ETAP 仿真对该无功补偿方案效果进行验证, 对后续类似海上高压工程具有一定的借鉴意义。

关键词: 海上油田群岸电; 长距离海底电缆; 无功补偿; 工程算法; ETAP

Optimal design of reactive compensation of shore power application in offshore oil and gas fields

WAN Guangfen, WEI Che, LIU Guofeng, HU Yiru

(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Based on the system architecture and key equipment parameters of shore power application engineering, the reactive power composition of each link of shore power project is analyzed. Unlike offshore wind submarine cable only connect sea wind field and land grid, an interconnecting submarine cable is added for shore power application project of offshore oil fields. The reactive power compensation problem of single cable becomes that of cable combination. Compared with offshore wind power, reactive power compensation scheme is more complex and difficult to configure. The reactive power compensation configuration scheme suitable for shore power application in offshore oilfields is studied, the recommended algorithm of fixed reactive power compensation and dynamic reactive power compensation capacity suitable for engineering application is summarized, and verifies the effect of the reactive power compensation scheme through ETAP simulation is verified. It has certain reference significance for similar offshore high voltage transmission projects.

Key words: shore power application in offshore oil and gas field; long distance submarine cable; reactive power compensation; Engineering application algorithm; ETAP

0 引言

为践行绿色发展理念, 中海油在渤海油田大规模启动海上油田群改用岸电供电项目。海上油田群一般离岸几十公里, 同海上风电交流送出相似, 海上油气田岸电项目同样需要采用长距离

的高压海底电缆为海上变电站平台供电。在相同电压下单位长度海缆的充电功率比架空线路高出一个数量级, 海底电缆的电容效应会产生大量的无功功率, 降低了电缆的有效负荷能力, 并抬升了电网电压, 且难以在海底输电电缆中间进行无

功补偿。无功补偿成为海上风电送出的关键技术之一。

海上风电无功补偿作为行业热点，已经有较多学者进行研究，文献[1-2]详细分析了不同海缆型号的充电功率，以及海缆的充电功率相比架空线大一个数量级结论。文献[3]提出以无功裕度判断各节点的无功缺额，再通过混合改进遗传算法，以降低网损、提高电压水平和最小化费用为目标进行无功补偿。文献[4]提出了以局部电压稳定指标与经济压差法相结合的方法进行无功补偿。文献[5]以安装补偿电容所带来的经济效益最大为目标，利用混合整数凸规划进行无功补偿。

与海上风电交流送出一般采用单根海缆不同，海上油气田群岸电对供电可靠性要求较高，一般由两个以上的海上变电站平台组成群组。目前常用的海上油田群供电模式如图1所示。每个油田群设一个海上电力动力平台（Electrical Power Platform, EPP），通过一条高压海底电缆连接到陆上新建开关站（变电站），再经陆地线路接入国家电网。同时，两个海上电力动力平台间设置互联海缆，互联海缆一端开关闭合处于热备状态，保障在一路上岸海缆故障工况下，互

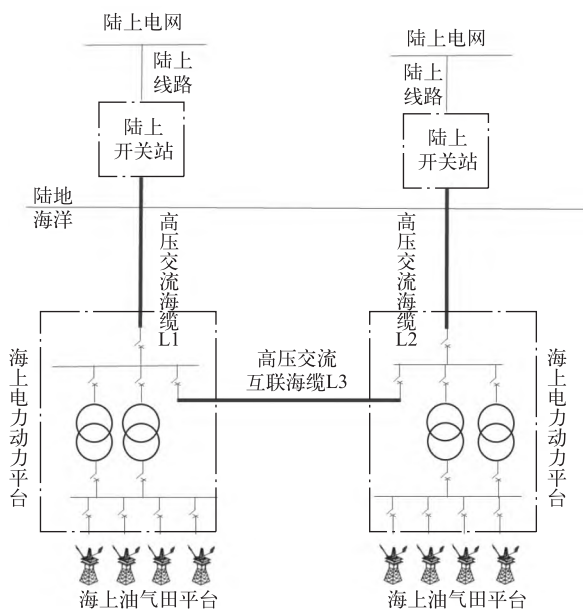


图1 海上油田群岸电典型供电结构图

Fig 1. Typical shore power structure diagram of offshore oilfields

联海缆另一侧开关迅速闭合，实现由一侧上岸海缆带两个油田群负荷。该方案提高了油田供电可靠性，但是多种工况下的海缆组合也大大增加了无功补偿的配置难度，合理的无功补偿配置方案对方案可行性意义重大。

本文将结合海上油气田群岸电应用工程特点，研究其长距离供电海缆的无功补偿问题，从工程实用设计角度出发，对比各种无功补偿装置特点，归纳总结出适用于海上油气田群岸电工程供电结构的无功补偿配置的工程简易配置算法，并基于典型系统进行ETAP软件仿真验证。

1 岸电交流输电系统无功配置

1.1 海上油田群岸电系统无功功率组成

海上油田群岸电系统需要的无功补偿量主要取决于整个系统内部产生或者消耗的无功。无功功率组成主要是陆上线路充电功率、高压海底电缆的充电功率、陆上及海上线路无功损耗、海上电力动力平台主变压器无功损耗、油气田群用电设备无功需求及油田内部中低压海缆无功需求。其中线路的充电功率为固定部分，线路和变压器的无功损耗随负荷变化而变化，是可变部分。考虑到目前海上油气田群岸电接入多为组网后的微电网，一般将油气田群用电设备无功需求及油田内部中低压海缆无功需求视为整体用户负载损耗。各部分无功损耗计算如下。

(1) 海底电缆/陆缆充电功率

$$Q_c = U^2 \omega c = 2\pi f c U^2 \quad (1)$$

式中， Q_c 为电缆的充电功率； f 为电网频率； c 为电缆对地电容值； U 为电缆电压。

(2) 海底电缆/陆缆无功损耗

$$Q_L = I^2 X \quad (2)$$

式中， Q_L 为电缆的无功损耗； I 为电缆平均电流有效值； X 为电缆电抗。

(3) 变压器无功损耗

$$Q_T = \frac{I_0 S_e}{100} \% + \frac{U_d S_e}{100} \% \left(\frac{S_{ca}}{S_e} \right) \quad (3)$$

式中， Q_T 为变压器的无功损耗； I_0 为变压器空载电流百分比； U_d 为变压器短路阻抗百分比； S_{ca} 为

计算视在功率； S_e 为变压器的额定容量； $\frac{S_{ca}}{S_e}$ 为变压器带载率。

(4) 用户负载无功需求

$$Q_f = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \frac{P}{\cos \varphi} \quad (4)$$

式中， Q_f 为用户负载无功需求； $\cos \varphi$ 为海上油气平台近EPP端负荷功率因数； P 为海上油气平台有功负荷（含油田内部网损）。

1.2 无功补偿设备特性及配置原则

类似海上风电，岸电工程需要考虑在有限的平台空间，造价最小的情况下如何保证无功电压控制的灵活性。针对岸电工程海上平台特殊性，

无功平衡与配置分析原则为：①尽量在陆上开关站更多配置高抗；②海上平台高抗尽量配置在一端；③在保障灵活性的前提下尽量减少SVG容量；④油气田内部平台满足无功就地平衡原则。

各工况下优先确定并统一海上平台的高抗配置方案，在此基础上确定各工况开关站的无功补偿配置规模；开关站考核点功率因数不低于95%，无功配置时需满足要求并留有一定裕度；实际运行工况较多，无功配置时应考虑补偿容量的灵活性。

目前常用的无功补偿设备主要包括并联电抗器/电容器、SVG、SVC以及有载调压无功补偿系统。设备特性见表1。

表1 典型无功补偿设备特性分析

Tab. 1 Characteristic analysis of typical reactive power compensation equipment

补偿方式	并联电抗器 / 电容器	静止型动态无功发生器 (SVG)	TCR 型高压动态无功补偿 (SVC)	有载调压式无功补偿系统
补偿效果	向系统输出无功，阶梯可调或不可调	可无极调节，输出或者吸收无功	可无极调节，输出或者吸收无功	向系统输出无功，阶梯可调或不可调
电能质量改善情况	提高功率因数，无法抑制谐波	提高功率因数，抑制电压波动，滤除谐波	提高功率因数，抑制电压波动，滤除谐波、抑制负序电流	提高功率因数，无法抑制谐波
故障率	低	高	低	有载分接头故障率高
投资及维护成本	均低	均高	均高	设备投资低，维护费用高

目前岸电工程无功补偿主要是针对海缆的容性效应，且长距离海缆产生的容性无功非常可观，采用费用较低的高压并联电抗器作为主要补偿，并配合可线性调节、可吸收和发出无功的SVG。且SVG布置在陆上更加接近并网点，动态调节响应速度和准确度更高^[6]。

1.3 无功配置方案

根据渤海岸电项目的工程经验，由于海上变电站平台空间限制，为减轻海上变电站平台重量，保障海上变电站的安全性，并控制造价，建议采用陆地加装固定高抗，同时安装动态无功补偿装置。海上根据互联海缆无功需要，在互联海缆常闭段变电站平台配置无功补偿。

固定无功补偿容量按照并网点最大无功功率

和最小无功功率平均值。利用SVG平衡由于不同年份及不同工况下的无功功率变化

$$Q_{fix} = \frac{Q_{min} + Q_{max}}{2} \quad (5)$$

$$Q_{SVG} \in [-(Q_{min} - Q_{fix}), (Q_{max} - Q_{fix})] \quad (6)$$

Q_{max} 为选择最小负荷工况下系统无功需求，计算公式为

$$Q_{max} = Q_{c小负荷} - Q_{L小负荷} - Q_{T小负荷} - Q_{f小负荷} \quad (7)$$

Q_{min} 为选择最大负荷工况下系统无功需求，计算公式为

$$Q_{min} = Q_{c大负荷} - Q_{L大负荷} - Q_{T大负荷} - Q_{f大负荷} \quad (8)$$

考虑互联海缆的特殊性，在海上油田岸电分析时需要分别分析含互联海缆及不含互联海缆两种工况下的 Q_{fix} 和 Q_{fix} ，通过分析可知含互联海缆

和不含互联海缆两种工况下固定无功补偿差异为互联海缆无功功率的一半。

海上含互联海缆侧配置固定高抗量，计算公式为

$$Q_{EPP-fix} = Q_{fix-含互联海缆} - Q_{fix-不含互联海缆} = \frac{Q_{c互联海缆}}{2} \tag{9}$$

陆地固定无功补偿量，应考虑去掉海上变电站平台固定无功补偿量，其高抗取值方法应按照不含互联海缆方案，计算公式为

$$Q_{陆上-fix} = Q_{fix-不含互联海缆} = \frac{Q_{max-不含互联海缆} + Q_{min-不含互联海缆}}{2} \tag{10}$$

SVG无功补偿量应按照含互联海缆工况下考虑，计算公式为

$$Q_{陆上-SVG} = Q_{SVG-含互联海缆} \tag{11}$$

2 案例分析

2.1 渤海某油田群岸电方案简介

以渤海某油田群岸电应用工程为例，拟在登陆点1和登陆点2附近各新建1座220 kV陆上开关站，在海上A油田群和B油田群附近分别新建海上A油田群电力动力平台（简称A EPP）和海上B油田群电力动力平台（简称B EPP）。岸上电力从两个陆上开关站分别通过1根220 kV海底电缆输送至A EPP和B EPP，A EPP和B EPP间通过单回路220 kV海底电缆进行互联，互联海缆在B EPP端开关常闭，设置快切装置，故障情况下快速投运，方案如图2所示。海上电动力平台用电需求见表2。

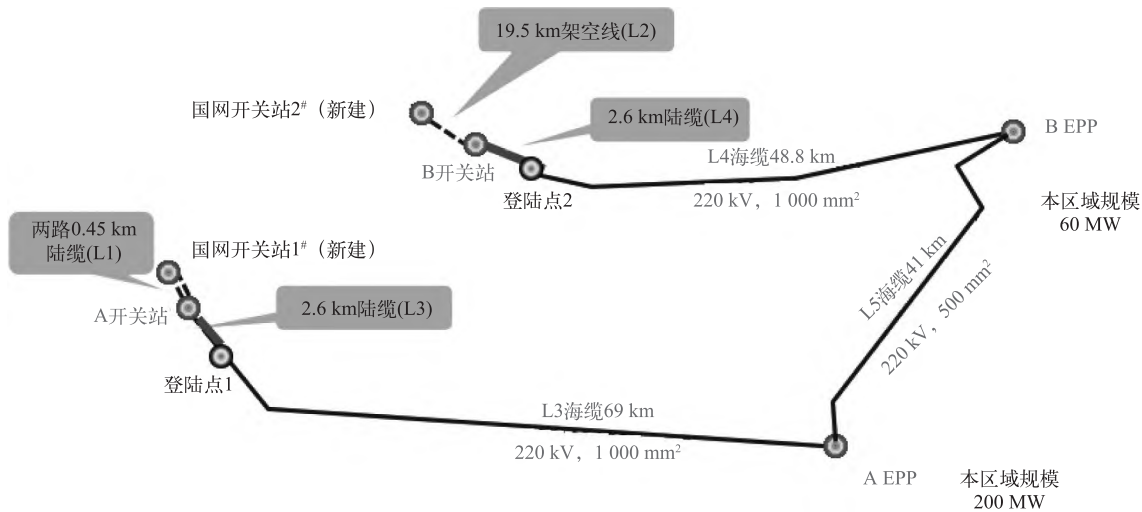


图 2 渤海某油田群岸电应用工程总体方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shore power application project of an oilfield group in Bohai Sea

表 2 海上电动力平台用电需求

Tab. 2 Electricity demand table of offshore electric power platform

EPP 平台	电压等级 /kV	最大负荷 /MW	最小负荷 /MW	功率因数
A EPP 平台	35	182.8	100.7	0.92
B EPP 平台	35	52.6	40.7	0.95

结合海缆输送能力及后期预留一定余量，该岸电项目接入规模为260 MW，其中A EPP接入规模为200 MW，B EPP接入规模为60 MW。

2.2 电网主要参数

各段线路长度汇总见表3。从表3可知，方案中220 kV高压海缆距离长、截面积大以及充电率大，合理的无功补充配置对技术可行性影响较大。主变压器相关电气参数见表4。

2.3 无功补偿配置方案

按照1.3节无功补偿配置计算方法，计算各方式下的无功需求量见表5。

表 3 各段线路充电功率汇总表

Tab. 3 Summary of charging power of each section of circuit line

线路	线路规格参数	电容 / (μF/km)	充电功率 /Mvar
陆缆 L1 长度	两回, 0.45 km, 220 kV, 3(1×800 mm ²) 陆缆	0.151	2.3
架空线路 L2 长度	单回, 19.5 km, 400 mm ² 架空线	0.015 7	5.1
陆缆 L3 长度	2.6 km, 220 kV, 3(1×800 mm ²) 陆缆	0.151	6.6
海缆 L3 长度	69 km, 220 kV, 3×1000 mm ² 海缆	0.176	203.6
陆缆 L4 长度	2.6 km, 220 kV, 3(1×800 mm ²) 陆缆	0.151	6.6
海缆 L4 长度	48.8 km, 220 kV, 3×1000 mm ² 海缆	0.176	144.3
海缆 L5 长度	41.1 km, 220 kV, 3×500 mm ² 海缆	0.128	90.1

表 4 主变压器相关电气参数

Tab. 4 Main transformer electrical parameters

变压器型号	参数值	无功损耗 /Mvar
220 kV 主变压器 SZ-240000/220 (A EPP: EPP-TR-001/002)	三相分裂绕组带励磁有载调压节能型变压器, 240/120/120 MV·A, 220±8×1.25%/35/35 kV, $U_{kl-2}\%$ =26, $I_0\%$ =0.35	4.4 (最小负荷) / 15 (最大负荷)
220 kV 主变压器 SSZ-70000/220 (B EPP: EPP-TR-001/002)	三相三绕组带励磁有载调压节能型变压器, 70/70 MV·A, 220±8×1.25%/35 kV, $U_{kl-2}\%$ =14, $I_0\%$ =0.5	0.9 (最小负荷) / 4.2 (最大负荷)

表 5 各工况下固定无功补偿及 SVG 补偿量计算表

Tab. 5 Calculation table of fixed reactive and SVG compensation amount

包含互联海缆工况		不含互联海缆工况		差值	
绥中陆地	Mvar	绥中陆地	Mvar	锦州 EPP	Mvar
Q_{max}	258.1	Q_{max}	168.0	Q_{max}	—
Q_{min}	125.7	Q_{min}	125.7	Q_{min}	—
Q_{fix}	191.9	Q_{fix}	146.9	Q_{fix}	45
Q_{SVG}	66.2	Q_{SVG}	21.2	Q_{SVG}	—
锦州陆地	Mvar	锦州陆地	Mvar	锦州 EPP	Mvar
Q_{max}	232.8	Q_{max}	142.8	Q_{max}	—
Q_{min}	137.0	Q_{min}	137	Q_{min}	—
Q_{fix}	184.9	Q_{fix}	139.9	Q_{fix}	45
Q_{SVG}	47.9	Q_{SVG}	2.8	Q_{SVG}	—

根据上文分析, 含互联海缆的B EPP平台配置45 Mvar固定高抗。在A登陆点陆地变电站配置150 Mvar高抗和70 MvarSVG。在B登陆点陆地变电站配置140 Mvar高抗和50 MvarSVG。

2.4 无功补偿校核

为验证计算方法的准确性, 搭建电网的 ETAP模型, 该仿真模型可体现整个岸电工程各环节的无功损耗, 分别在油田群最大和最小工况下开展t种工况的校核分析, 分析开关站考核点的功率因数, 可验证工程方法的准确性。

最大负荷和最小负荷各工况下无功配置、补偿容量及开关站考核点功率因数分别见表6、表7。

表 6 最大负荷各工况下无功配置、补偿容量及开关站考核点功率因数

Tab. 6 Reactive power configuration and power factor of switch station assessment point maximum load

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
	正常运行	海上 A 油田群 L 型空载	海上 A 油田群 L 型带载	海上 A 油田群 I 型	海上 B 油田群 L 空载	海上 B 油田群 L 带载	海上 B 油田群 I 型
登陆点 1 220 kV 开关站 / Mvar	—130 (20) *	0	0	0	—170 (—20)	—90 (60)	—80 (70)
登陆点 2 220 kV 开关站 / Mvar	—160 (—20)	—190 (—50)	—160 (—20)	—160 (—20)	0	0	0
海上 B 油田群海上动力 平台 /Mvar	—45	—45	—45	0	—45	—45	—45
开关站考核点功率因数 (%)	99.90	98.37	99.43	97.56	99.89	99.92	99.27

注: () * 内为 SVG 出力。海上油田群 1# L 空载指海上 A 油田群上岸海缆带海上 A 油田群负荷以及空载互联海缆; 海上 A 油田群 L 带载指海上 A 油田群上岸海缆带海上 A 油田群和海上 B 油田群两个油田群负荷; 海上 A 油田群 I 指海上 A 油田群上岸海缆仅带海上 A 油田群油田群负荷。海上 B 油田群工况同海上 A 油田群区域。

表 7 最小负荷各工况下无功配置、补偿容量及开关站考核点功率因数

Tab. 7 Reactive power configuration and power factor of switch station assessment point minimum load

工况	工况 1 正常运行	工况 2 海上 A 油田群 L 型空载	工况 3 海上 A 油田群 L 型带载	工况 4 海上 A 油田群 I 型	工况 5 海上 B 油田群 L 空载	工况 6 海上 B 油田群 L 带载	工况 7 海上 B 油田群 I 型
登陆点 1 220 kV 开 关站 /Mvar	-170 (-20) *	0	0	0	-170 (-20)	-130 (20)	-90 (60)
登陆点 2 220 kV 开 关站 /Mvar	-160 (-20)	-190 (-50)	-190 (-50)	-160 (-20)	0	0	0
海上 B 油田群海上 动力平台 /Mvar	-45	-45	-45	0	-45	-45	-45
开关站考核点功率 因数 (%)	99.97	99.79	99.61	100.00	99.98	99.80	98.59

注：() * 内为 SVG 出力。

综合分析通过简化后的工程应用计算方法设置的无功补偿配置方案，能够满足岸电工程在最大、最小负荷情况下各种工况的运行需求，并通过控制 SVG 出力可满足在最大、最小负荷之间无功需求的平滑调节，验证了工程简易算法的有效性。

3 结束语

本文详细介绍了海上油气田群岸电项目无功补偿计算方法及配置原则，通过分析推导出适用于含互联海缆的岸电工程应用的无功补偿简易算法。以渤海某油田群岸电应用项目为例，通过 ETAP 仿真工况分析验证了该方法的准确性，对今后海上高压输电项目无功补偿装置选取及容量计算具有指导意义。

参考文献

[1] JOHANSSON S G, LILJESTRAND L, KROGH F, et al. AC cable solutions for offshore wind energy [EB/OL].(2011-12-13)[2012-01-07].

[2] MIAO Yuancheng. The impact of large-scale

offshore wind farm on the power system[C]. China International Conference on Electricity Distribution, IEEE, 2010: 1-5.

[3] 刘传铨, 张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 78-81.

[4] 姜涛, 陈厚合, 李国庆. 基于局部电压稳定指标的电压/无功分区调节方法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 207-213.

[5] 李静, 戴文战, 韦巍. 基于混合整数凸规划的含风力发电机组配电网无功补偿优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 121-129.

[6] 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.

作者简介

万光芬（1986—），女，硕士，高级工程师，从事海洋石油平台电气设计工作。

（收稿日期：2022-01-23）