

海上多平台气-电互联系统稳态建模与能量流分析

孟庆伟¹,管清爽¹,张丽霞¹,王艳松¹,李强²

(1. 中国石油大学(华东) 新能源学院,山东 青岛 266580;2. 中海石油研究总院,北京 100027)

摘要:海上多平台气-电互联系统的耦合元件和稳态模型与传统气-电互联系统有所不同,故而对其进行稳态建模和能量流分析。互联系统的模型不仅对气网、电网和传统气-电互联系统的耦合元件压缩机和透平发电机进行了建模,还考虑了海上多平台的特点,提出海上平台电采气耦合过程并构建模型。基于顺序潮流算法,采用适合多平台实际情况的多平衡节点能量流算法进行能量流分析。最后,以某海上多平台气-电互联系统为算例,计算结果验证了所提模型的适用性和能量流算法的有效性。

关键词:海上多平台;气-电互联系统;稳态建模;能量流分析;多平衡节点

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202010026

0 引言

在能源革命、“互联网+”等国家战略的号召下,能源互联网逐步成为当前能源领域的研究热点^[1-2],国家电网提出的“三型两网”的目标,更加奠定了能源互联在能源发展过程中的重要作用。近年来,世界能源将目光转向了油田中的天然气,特别是海上油田中的天然气。我国近海天然气资源丰富,“增储上产”空间巨大^[3]。海上平台发电机以天然气为主燃料,天然气的开采与处理需要电能,故海上多平台系统是典型气-电互联系统,其气-电耦合紧密,是综合能源系统基本形态的具体体现。因此,进行海上平台气-电互联系统的稳态建模与能量流分析是海上油气生产安全稳定运行的基础工作^[4]。

能量流分析是能源互联安全稳定性分析中最基础也是最重要的一环,对其模型的搭建和算法的研究一直是能源互联研究热点之一。在电力系统领域,电网的潮流模型框架和网络分析方法已然成熟;在天然气系统领域,燃气管网的模型以稳态和暂态仿真模型为主,管网结构包括管道、压缩机、多气源和负荷等多种形式,天然气网络遵循流体力学定律,主要分析方法有环平衡法、有限元节点法^[5]和牛顿节点法^[6],大多从压力、温度、流量等变量分析天然气系统的潮流。近年来,能源集线器、电转气技术^[7-8]、压缩机和燃气轮机作为气-电互联系统的关键耦合元件已得到广泛研究。基于此,多能流网络的联合建模和能量流计算也得到研究。文献[9]利用顺序求解法计算电网与天然气耦合时的稳态能量

流。文献[10]基于顺序求解法分析将能源集线器模型作为平衡节点对气-电互联系统的影响。文献[11-13]构建了气-电能源互联系统的统一潮流算法,考虑了电力系统并网和孤岛运行方式下的多能源耦合关系以及考虑了不确定因素的概率能量流分析。文献[14-15]推导了天然气动态潮流方程,求解了气-电互联系统的多时段暂态能量流,并建立了多时段的优化运行模型和调度;文献[16]则提出了自适应步长的改进统一法,以弥补多能流算法对初值敏感的不足。文献[17-18]分析了考虑天然气系统影响的多能流静态安全耦合以及对电网的连锁故障评估,表明2个系统的耦合性对故障状态下的关键状态变量有着重要的影响。文献[19]进一步综述了电-气综合能源系统的安全分析与优化控制的研究现状,并展望相关研究方向。但从已有的气-电互联能量流分析算例而言,均为电力系统和天然气网的构造算例。随着海上能源大力开发利用,海上平台已成为完备的微网,一般以孤岛的形式存在,可实现能源应用的自给自足。海上多平台气-电互联系统是真实的互联系统,其相较于传统气-电互联系统更为复杂,一方面要考虑海上平台的特殊环境;另一方面受天然气开采处理于一体的影响,气-电互联的耦合元件也有所不同。

本文基于海上平台开采天然气的实际流程和处理工艺,对海上多平台气-电互联系统进行稳态建模和能量流分析,为了更准确地描述海上平台的运行状态,提出多平衡节点改进的能量流顺序求解方法。首先,建立海上电力互联系统和气网的模型;其次,量化天然气的开采和处理过程,提出电采气耦合过程,建立气-电耦合元件的数学模型;然后,基于海上电力互联的多机共同作平衡机的特点,提出多平衡节点改进的能量流顺序求解方法;最后,以某实际海上互联平台为例,验证了模型的有效性和算法的正确性。

收稿日期:2020-01-20;**修回日期:**2020-08-13

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GGX103045);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(18CX02113A)

Project supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province(2019GGX103045) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(18CX02113A)

1 海上平台气-电互联系统稳态建模

1.1 海上平台电力系统

海上平台由于油气处理设施用途各异,通常将平台大致分为海上中心平台(主平台)和井口平台。主平台向各井口平台提供动力并将井液进行加工处理,其电力系统包括电源(透平发电机(TG)),电压等级主要有35、10.5、6.3、0.4、0.23 kV,负载主要包含工艺设施、公用机械等综合处理设备和照明系统;井口平台将开采出的油气进行简单的计量、处理或直接外输,集中输送到主平台进行处理,其电能由主平台提供,不设置电源,其电力系统由配电装置、电缆和用电负载组成。主平台与井口平台间电能传输的示意图如附录A图A1所示,主平台通过海底电缆和栈桥这2种形式将电能分别传输到远距离和较近的井口平台上为其提供动力。

实际的海上油气田包括多个平台,若每个平台的电力系统相互独立,将存在投资较大、供电可靠性较差等问题^[20]。因此,为增强海上平台电力系统的供电可靠性,保证生产安全稳定经济运行,对平台之间的电力系统进行电力组网,形成海上平台互联电力系统,如图1所示。

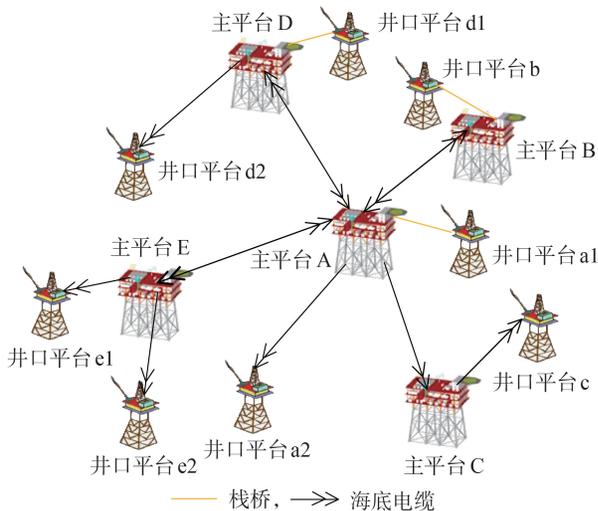


图1 海上平台电力系统互联示意图

Fig.1 Interconnection schematic diagram of offshore platform power system

海底电缆与传统架空线相比,呈现较大的电容性,故在计算和分析中不可忽视电纳。但本文研究中海上平台均进行了电抗器补偿,实际给出的海底电缆数据为补偿后的值,可直接参与计算。所以,海底电缆模型与传统的电力系统架空线模型在本文潮流计算中基本一致,均用线路的 π 型等效电路。

1.2 海上平台天然气系统模型

海上平台为提高能源效率,在允许的情况下进行油气分离,将原油和天然气分别传输到陆地端。其中,天然气经过开采、处理工艺等耗电过程后,通

过平台间的传输互联构成了天然气网。由文献[14]可知,在燃气负荷发生扰动的情況下,采用天然气系统稳态潮流模型和动态潮流模型计算得到的最终平衡状态下的结果基本保持一致。考虑到本文研究的是在某一时间气-电互联系统的潮流分布,用天然气系统稳态潮流模型是合理的。

节点压力 p 和管道流量 f 是表征天然气网稳态运行的主要物理量,对于气网中输气管道 mn (m, n 为天然气节点),其稳态条件下的流量方程为^[6]:

$$f_{mn} = k_{mn} s_{mn} \sqrt{s_{mn} (p_m^2 - p_n^2)} \quad (1)$$

$$s_{mn} = \begin{cases} 1 & p_m > p_n \\ -1 & p_m < p_n \end{cases} \quad (2)$$

其中, k_{mn} 为管道常数,与管道内径、长度、效率和天然气流体等相关; s_{mn} 反映了管道中气体的流动方向。

本文采用牛顿法求解气网潮流。表征气网稳态运行的主要物理量有流量和压力,将气网中的节点分为以下2类:①负荷节点,该类型节点的流出流量恒定,节点压力为未知量,类似于气网中的PQ节点;②气源节点,其出口压力恒定,流量供应充足,类似于气网中的平衡节点。

根据基尔霍夫第一定律(KCL),任何一个节点的流量代数和为0,用节点方程表示为式(3);根据基尔霍夫第二定律(KVL),沿着任何一个闭合回路的压力降为0,用回路方程表示为式(4)。

$$L = Af \quad (3)$$

$$B\Delta\Pi = 0 \quad (4)$$

其中, L 为节点负荷矩阵; f 为管道流量矩阵; $\Delta\Pi$ 为管道两端节点压力平方的差的矩阵; A 为支路-节点关联矩阵, B 为支路-回路关联矩阵,具体参考方向与电网中类似。

1.3 海上平台气-电互联系统模型

海上平台的气-电互联体现在平台间的气-电互联和平台内的气-电互联,整体互联示意图如图2所示,天然气系统和电力系统通过气网中的耗电设备、电网中的耗气设备紧密联系在一起。体现平台间的互联和耦合变量的气-电互联示意图如附录A图A2所示。图中, P_{gas} 为耦合元件消耗的功率; P_c 为透平发电机发出的电功率; f_c 为透平发电机消耗的天然气流量; $\sum F$ 为每个平台的天然气总产量。

1.4 海上平台气-电耦合元件建模

除了常规气-电耦合元件,海上平台气-电互联系统还存在着特殊的耦合过程:天然气工艺处理。平台内大致分为以下2个工艺过程:①平台油气开采工艺,通过一系列处理工艺将原油与天然气分离、计量,建立电功率与天然气流量之间的关系,下文将这一过程简述为电采气过程;②天然气压缩和脱水过程,利用多级压缩机组实现去除凝析油、天然气增

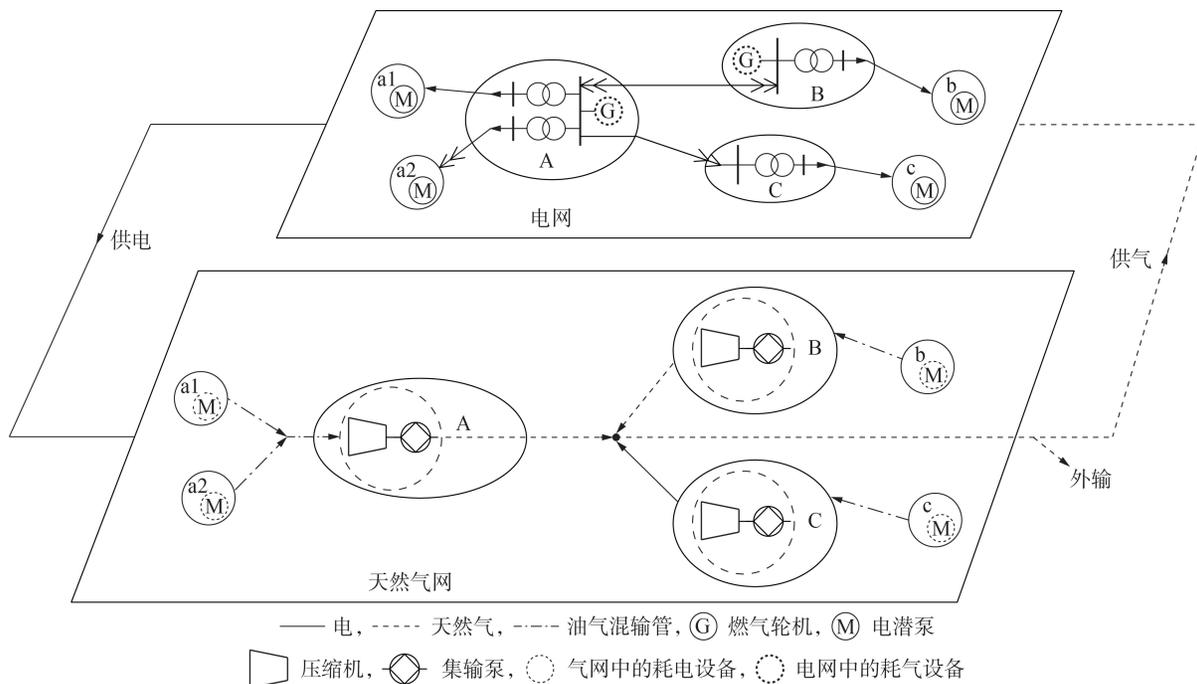


图2 海上平台气-电互联系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of offshore platform gas-electricity interconnection system

压(气体变气体),使体积缩小,便于传输且大幅减小了运输成本。

1.4.1 海上平台电采气

电采气技术的主要设备包括电潜泵、段塞流捕集器和分离器等工艺设备。将电能输入至天然气输出的工艺过程封装在电采气系统中,将电采气过程的整体作为耦合元件,等效为电网中的负荷、气网中的气源,具体流程如图3所示。

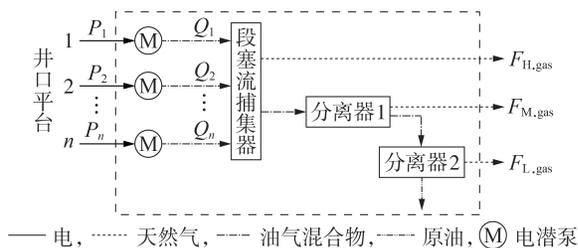


图3 电采气技术示意图

Fig.3 Schematic diagram of power to gas technology

电潜泵是海上采油工艺常用的开采设备,是将电动机和多级离心泵一起置入油井液面以下进行抽油的举升设备,可将电能转换为机械能,把井液举升到地面。其电能与井液量之间的关系为:

$$P = \rho g Q H / (1000 \mu) \quad (5)$$

$$\rho = (1 - \beta_1 - \beta_2) \rho_o + \beta_1 \rho_w + \beta_2 \rho_g \quad (6)$$

其中, P 为电潜泵消耗的功率(W); g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; ρ 为液体密度 (kg/m^3); β_1 、 β_2 分别为井液体积含水率和含天然气率; ρ_o 、 ρ_w 、 ρ_g 分别为原油、水、天然气的密度; Q 为油井产液 (m^3/s); H 为油井

总动压头(m); μ 为电潜泵的工作效率。

段塞流捕集器和油气分离器的作用类似,多用于捕集电潜泵多相流管道流出的井液,为井液波动提供缓冲容积,以使气液分离。电采气过程中与天然气含量无明显关系的耗电设备,如注水泵、污水泵等视为恒功率,耦合在电采气过程中^[21]。电采气过程的电功率和天然气流量之间的耦合关系式为:

$$\begin{bmatrix} F_{H,\text{gas}} \\ F_{M,\text{gas}} \\ F_{L,\text{gas}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \\ (1-\lambda)k_1 \\ (1-\lambda)(1-k_1)k_2 \end{bmatrix} \sum_{i=1}^{\omega} \frac{1000 P_i \mu}{\rho g H} \quad (7)$$

其中, $F_{H,\text{gas}}$ 、 $F_{M,\text{gas}}$ 、 $F_{L,\text{gas}}$ 分别为高压、中压、低压天然气流量; ω 为电潜泵的个数; λ 和 k_1 、 k_2 分别为段塞流捕集器和分离器 1、2 的天然气分离系数,与混合物密度、压力和温度等因素有关。

1.4.2 压缩机

天然气处理工艺体现了电采气系统中天然气的压缩脱水过程。电采气过程输出的天然气要经过天然气加压进行管道运输,并施行脱水环节以达到工业要求,主要特点是有低压、中压、高压多级压缩。

压缩机作为典型的气-电耦合元件在天然气工艺中广泛存在。海上平台压缩机以电压缩机为主,在气网建模和稳态天然气流量分析中,最重要的非管道元件也是压缩机,其消耗功率和天然气流量间的关系为:

$$P_{\text{com}} = \frac{f_{\text{in}} \alpha}{36000 \eta (\alpha - 1)} \left[\left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)^{(\alpha-1)/\alpha} - 1 \right] = P_{\text{com}}(f_{\text{in}}) \quad (8)$$

其中, P_{com} 为压缩机的功率(MW); f_{in} 为压缩机的输

入流量(m^3/h); η 和 α 分别为压缩机的效率和压缩因子; p_{in} 和 p_{out} 分别为压缩机的入口压力和出口压力(bar)。用 $P_{\text{com}}(f_{\text{in}})$ 表示上述关系式,则含电驱动压缩机气网图如图4所示。

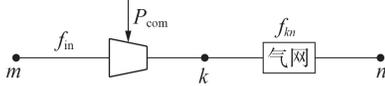


图4 含电驱动压缩机气网图

Fig.4 Diagram of gas network with electricity compressor

已知压缩机的入口流量,出口压力恒定,且满足 $f_{\text{in}}=f_{\text{kn}}$ 。压缩机应满足约束条件,其出口压力和压缩比均应在其上、下限范围之内^[9]。天然气的处理工艺一般采用多级压缩,其整体耦合性表达为:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{com}}(F_{\text{L, gas}}) + P_{\text{com}}(F_{\text{L, gas}} + F_{\text{M, gas}}) + n'P_{\text{com}}(F_{\text{L, gas}} + F_{\text{M, gas}} + F_{\text{H, gas}}) \quad (9)$$

其中, P_{Σ} 为多级压缩过程消耗的总功率(MW); n' 为高压压缩机的台数。

1.4.3 基于透平发电机的能源集线器

海上平台系统达到电力自给自足的状态,透平发电机驱动电网和气网中的所有用电设备,气网中的天然气通过管道传输到电网,作为燃料驱动透平发电机发电。因此透平发电机是电网中的电源,在气网中相当于负荷。透平发电机输入的天然气流量与输出的电功率的关系为^[9]:

$$P_{\text{G}} = \eta_{\text{TC}} f_{\text{G}} C_{\text{Vgas}} / 3600 \quad (10)$$

其中, P_{G} 为透平发电机的输出功率(MW); f_{G} 为透平发电机消耗的天然气流量(m^3/h); η_{TC} 为透平发电机的转换系数; C_{Vgas} 为燃料的低热值(MJ/m^3)。

平台上还存在一定的热负荷,由透平发电机和补燃锅炉供给,可用基于透平发电机的能源集线器来描述其中的电/气/热能源耦合关系,基本结构图如图5所示。它由透平发电机和补燃锅炉共同构成,输入环节只有天然气,直接输入到透平发电机和补燃锅炉;输出环节包括电能和热能两部分,其中输出的电能由透平发电机供给,输出的热能由透平发电机和补燃锅炉共同产生。

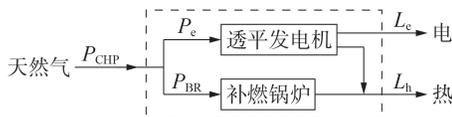


图5 基于透平发电机的能源集线器

Fig.5 Energy hub based on TG

由此得出式(11)所示的耦合关系式。

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v\eta_{\text{TC}} \\ v\eta_{\text{TC}}^h + (1-v)\eta_{\text{BR}} \end{bmatrix} P_{\text{CHP}} \quad (11)$$

其中, P_{CHP} 为能源集线器与天然气网络的能量交互值; v 为天然气分配系数,且 $0 \leq v \leq 1$; η_{TC}^e 和 η_{TC}^h 分别

为天然气经过透平发电机转化为电能和热能的转换效率; η_{BR} 为补燃锅炉效率; L_e 和 L_h 分别为供应的电负荷和热负荷(与功率 P_{CHP} 同单位)。本文研究以海上平台气-电互联系统为主,暂不考虑热负荷。

2 多平衡节点的能量流求解

采用顺序求解法时,电力潮流方程可与天然气系统分开求解,可以在现有电力系统潮流程序中添加天然气模块和电-气耦合分析模块来完成^[10]。传统基础的顺序能量流算法通常固定燃气轮机的出力,通过调节火力发电机和气源来保证互联系统的稳定,未考虑到燃气轮机的双重约束,即燃气轮机的有功功率约束不仅对应于发电机自身的运行极限,还要考虑可以从气网中提取天然气的流量约束。气-电互联系统中,具有发电和产气功能的耦合元件的调节性能通常更好,如燃气轮机响应速度快,更利于功率调节。在很多特殊场景下,多个发电单元的各个燃机共同承担系统的不平衡功率^[22],单平衡节点算法限制了系统的功率调节^[23]。因此,互联系统中的电网采用多平衡节点潮流算法较为适宜,尤其是海上多平台电力互联系统中将多个平台的多个燃机均作为平衡单元。本文采用多平衡节点改进的能量流顺序求解方法对海上多平台气-电互联系统进行能量流求解。

电网潮流方程和稳态潮流平衡方程分别为:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{\text{G},i} - P_{\text{L},i} - P_{\text{g}}^i - P_i \\ \Delta Q_i = Q_{\text{G},i} - Q_{\text{L},i} - Q_i \end{cases} \quad (13)$$

其中, P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功和无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 之间导纳的实部和虚部; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角差; ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为节点 i 注入的有功和无功功率偏差; $P_{\text{G},i}$ 、 $Q_{\text{G},i}$ 分别为发电机节点 i 发出的有功和无功功率; $P_{\text{L},i}$ 、 $Q_{\text{L},i}$ 分别为负荷节点 i 的有功和无功功率; P_{g}^i 为气网中的耦合耗电元件在电网节点 i 的等效电负荷。通常情况下,电网中将节点分为3种类型:PQ节点、PV节点、V θ 节点。选取一个平衡节点的相角作为潮流计算的参考相角。但平衡节点不等于参考节点,参考节点只能有1个。

采用基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法^[24]进行求解,PV节点与常规直角坐标中处理方式相同,对于PQ节点将常规潮流计算中节点注入量由牛顿法的复功率改变为电流,修正方程中的不平衡量由计算有功和无功功率的偏差改变为计算节点注入电流偏差,修正方程为:

$$\begin{cases} \Delta I_{xi} = \frac{P_i e_i + Q_i f_i}{e_i^2 + f_i^2} - \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) \\ \Delta I_{yi} = \frac{P_i f_i - Q_i e_i}{e_i^2 + f_i^2} - \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ \Delta P_i = \sum_{j=1}^n [e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)] - P_i \\ \Delta U_i^2 = (e_i^2 + f_i^2) - U_i^2 \quad i = m+1, m+2, \dots, m+r \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

其中, n 为节点总数; $i = 1, 2, \dots, m$ 时为 PQ 节点, $i = m+1, m+2, \dots, m+r$ 时为 PV 节点, $i = m+r+1, m+r+2, \dots, n$ 时为平衡节点; ΔI_{xi} 、 ΔI_{yi} 分别为节点 i 注入电流偏差的实部和虚部; e_i 、 f_i 分别为节点 i 电压的实部和虚部。对应的雅可比矩阵如式 (15) 所示, PQ 节点对应的雅可比矩阵子块为 H 、 N 、 J 、 L , 均为 $m \times (m+r)$ 维矩阵; PV 节点对应的 K' 、 E' 、 S' 、 R' 子块为 $r \times (m+r)$ 维矩阵, 矩阵元素与传统潮流的直角坐标形式相同。该算法的流程图如图 6 所示。该算法优点是在迭代过程中, 雅可比矩阵中 PQ 节点对应子块的非对角元素

不变, 只需对 PV 节点对应的对角元素和子块进行校正。

$$\begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{1m+r} & N_{11} & \dots & N_{1m+r} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{m1} & \dots & H_{mm+r} & N_{m1} & \dots & N_{mm+r} \\ K'_{11} & \dots & K'_{1m+r} & E'_{11} & \dots & E'_{1m+r} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ K'_{r1} & \dots & K'_{rm+r} & E'_{r1} & \dots & E'_{rm+r} \\ J_{11} & \dots & J_{1m+r} & L_{11} & \dots & L_{1m+r} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{m1} & \dots & J_{mm+r} & L_{m1} & \dots & L_{mm+r} \\ S'_{11} & \dots & S'_{1m+r} & R'_{11} & \dots & R'_{1m+r} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ S'_{r1} & \dots & S'_{rm+r} & R'_{r1} & \dots & R'_{rm+r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{1,x} \\ \vdots \\ \Delta U_{m+r,x} \\ \Delta U_{1,y} \\ \vdots \\ \Delta U_{m+r,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_{x1} \\ \vdots \\ \Delta I_{xm} \\ \Delta P_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta P_{m+r} \\ \Delta I_{y1} \\ \vdots \\ \Delta I_{ym} \\ \Delta U_{m+1}^2 \\ \vdots \\ \Delta U_{m+r}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3 算例分析

3.1 算例 1

采用 3 机 9 节点系统和文献 [9] 中的天然气算例组成测试系统并进行适当改进, 用以验证算法的正确性, 其拓扑结构如图 7 所示。电网是 9 节点系统, 节点 E2、E3 为透平发电机节点, 节点 E1 为传统发电机。气网由 12 个节点、11 条管道、2 个供气源、2 个压缩机组成, 其中 I、II 分别为燃气压缩机、电压压缩机, 节点 N4、N8 为透平发电机供气。

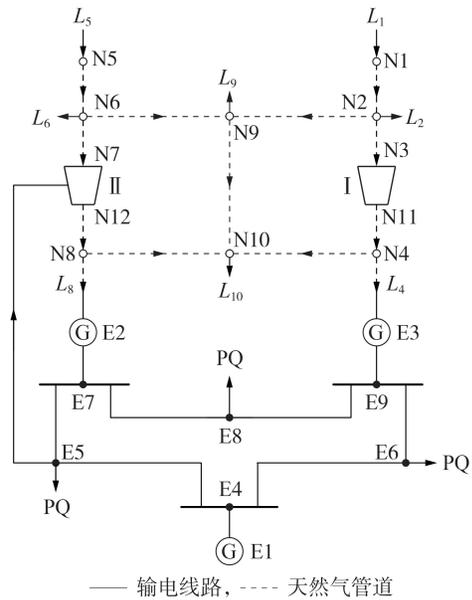


图 7 算例网络拓扑图

Fig.7 Network topology diagram of example

表 1—3 给出了算例 1 中电力和天然气系统的计算结果, 场景 1 为利用本文提出的多平衡节点改进的能量流顺序求解法的计算结果, 场景 2 为利用传统的统一求解法的计算结果。表中, 电压为标幺值。由计算结果可发现, 采用 2 种方法计算得到的各个变量结果都很接近, 从而验证了多平衡节点改

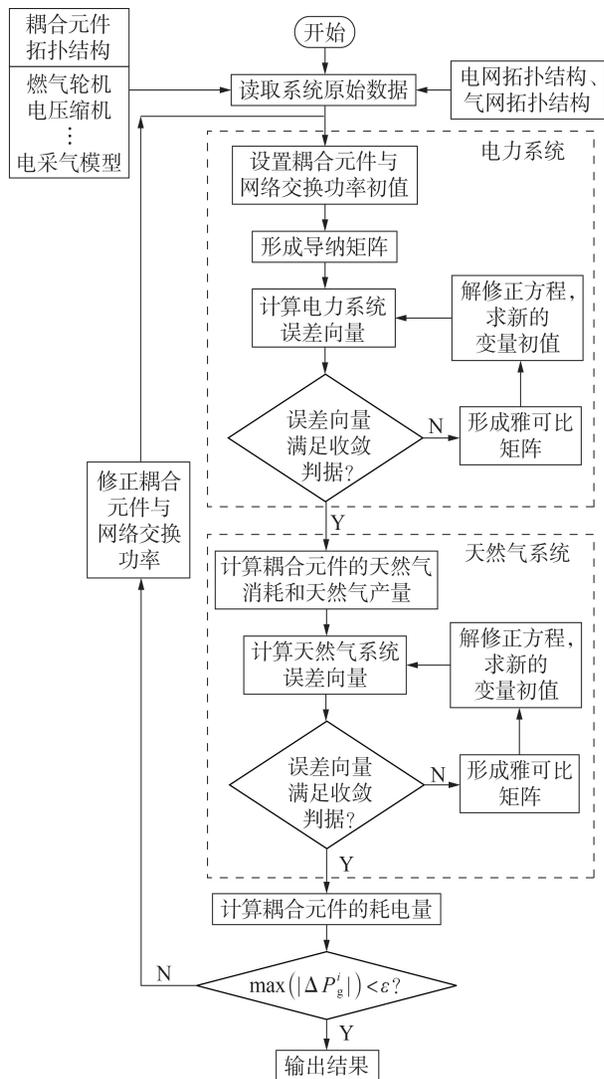


图 6 计算流程图

Fig.6 Flowchart of calculation

表1 电力系统各节点电压

Table 1 Node voltage of power system

节点	电压		节点	电压	
	场景1	场景2		场景1	场景2
E1	1.0400	1.0400	E6	1.0126	1.0127
E2	1.0250	1.0250	E7	1.0257	1.0258
E3	1.0250	1.0250	E8	1.0158	1.0159
E4	1.0257	1.0258	E9	1.0323	1.0324
E5	0.9954	0.9956			

表2 天然气网络各节点压力

Table 2 Node pressure of gas network

节点	压力 / bar		节点	压力 / bar	
	场景1	场景2		场景1	场景2
N1	40.0000	40.0000	N7	22.2547	22.2677
N2	30.6374	30.6410	N8	27.7789	27.7818
N3	29.6002	29.6052	N9	26.2206	26.2250
N4	28.2850	28.2872	N10	25.3155	25.3192
N5	40.0000	40.0000	N11	30.0000	30.0000
N6	27.4215	27.4263	N12	30.0000	30.0000

表3 天然气网络各管道流量

Table 3 Pipeline flow of gas network

管道	流量 / (m ³ ·h ⁻¹)		管道	流量 / (m ³ ·h ⁻¹)	
	场景1	场景2		场景1	场景2
N1-N2	3.133×10 ⁵	3.132×10 ⁵	N8-N10	1.179×10 ⁵	1.178×10 ⁵
N2-N3	8.731×10 ⁴	8.725×10 ⁴	N6-N9	1.001×10 ⁵	1.001×10 ⁵
N11-N4	8.730×10 ⁴	8.724×10 ⁴	N5-N6	3.953×10 ⁵	3.952×10 ⁵
N4-N10	7.305×10 ⁴	7.304×10 ⁴	N6-N7	1.452×10 ⁵	1.451×10 ⁵
N2-N9	7.599×10 ⁴	7.599×10 ⁴	N12-N8	1.452×10 ⁵	1.451×10 ⁵
N9-N10	6.759×10 ⁴	6.762×10 ⁴			

进的能量流顺序求解法的正确性。

首先利用多平衡节点改进的能量流顺序求解法求得节点E2和E3的2台透平发电机的功率分别为163.3654、85.1781 MW。若采用定透平发电机出力的传统能量流顺序求解法,燃气轮机不作为耦合节点,仅有电压缩机作为耦合节点,选取2种场景:场景A是选择节点E1为平衡节点,节点E2出力固定为163.3654 MW,节点E3的出力固定为135 MW;场景B是选择节点E1为平衡节点,节点E2出力为113 MW。3种场景下天然气系统中节点压力值如图8所示。

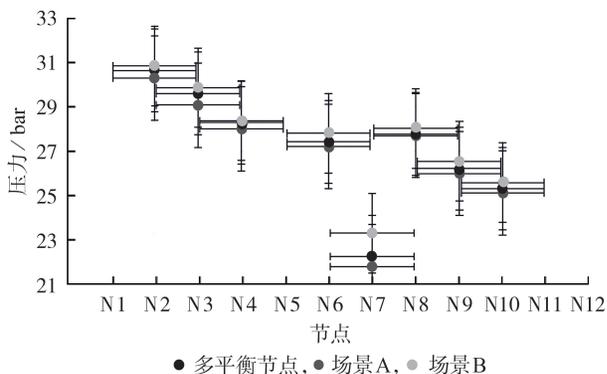


图8 3种场景下的节点压力

Fig.8 Node pressure under three scenarios

由图8可以看到,节点N7的压力值偏差最大达到1.06479 bar,透平发电机的出力定值的选取会影响天然气管网的潮流分布。

3.2 算例2

以某个海上多平台气-电互联系统为例,气-电互联系统的网络拓扑如图9所示。其中,将每个井口平台视为负荷节点,算例系统实则为4节点电网和4节点气网的互联系统。电网相关参数见附录B表B1和表B2,气网相关参数见附录B表B3。以2017年冬季负荷工况为例进行求解,已知平台内所有透平发电机每天的用气量为 $4.5 \times 10^5 \text{ m}^3$,整个互联平台的外供负荷需求如表4所示。

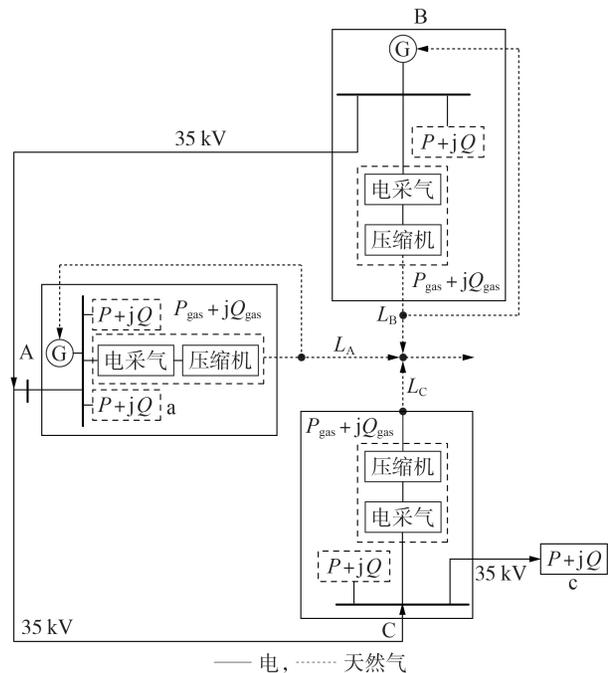


图9 某实际多平台气-电互联网络拓扑

Fig.9 Practical topology of multi-platform gas-electricity network

表4 气网外供需求

Table 4 Load demand of gas network

区域	外供气量 / (m ³ ·d ⁻¹)
A	1.47×10 ⁶
B	2.70×10 ⁵
C	1.10×10 ⁵
总计	1.85×10 ⁶

计算该工况下的能量流,得到各平台透平发电机的耗气量、各平台电采气和电压缩机的耗电量、各平台有功负荷数据对比分别如表5—7所示。由表5可知,计算得到的透平发电机每天的总用气量为 $4.7532 \times 10^5 \text{ m}^3$,相对误差为5.63%。平台A和平台B为中心平台,各有4台和2台透平发电机组,正常运行时,机组工作在安全范围内,并无越限行为。平台工作电压均在0.95~1.05 p.u.范围内波动,距离电源最远的井口平台c电压为0.9536 p.u.。由表6可知,

气网中的总耗电功率(电采气和电压缩机功率之和)为 15.8177 MW,约占整个电网负荷的 33%,所以在分析海上多平台气-电互联系统时,采用耦合求解是很有必要的。由表 7 发现,利用气-电互联系统考虑耦合元件计算得到的总负荷与测量数据相差 4.03%,由此可证明海上多平台气-电互联系统计算模型和方法的有效性。

表 5 各平台机组出力

Table 5 Output of units on platforms

平台	机组个数	机组额定功率 / MW	有功功率 / MW	用气量 / (m ³ ·d ⁻¹)
A	4	11.5	40.0614	3.8926×10 ⁵
B	2	11.5	8.8572	8.6062×10 ⁴

表 6 气网中的耗电功率

Table 6 Power consumption in gas network

平台	耗电功率 / MW	
	压缩机	电采气
A	4.2573	6.6784
B	0.8224	1.4716
C	0.2392	2.3488

表 7 各平台有功负荷数据对比

Table 7 Comparison of active load data of platform

平台	测量数据 / MW	仿真数据 / MW	相对误差 / %
A	31.467	33.573	6.69
B	5.207	6.444	23.75
C	7.786	6.942	-10.74
c	1.752	1.752	0
总负荷	46.392	48.261	4.03

4 结论

本文对海上多平台气-电互联系统进行了较详细的建模,并提出了一种基于多平衡节点改进的顺序能量流计算方法,通过算例分析得到以下结论:

(1)与传统气-电互联系统不同,海上多平台系统是真实的、典型的微气-电互联系统,具有电采气、多级压缩过程、透平发电机等耦合节点,是双向耦合系统;

(2)通过与成熟的能量流计算方法对比,验证了提出的基于多平衡节点能量流计算方法的正确性,其适用于海上多平台气-电互联系统的能量流分析。

需要指出的是,本文的研究主要集中于海上平台气-电互联系统能量流分析的稳态建模,未考虑管道惯性、系统负荷动态特性等因素,未来研究主要是进行气-电互联系统动态计算与分析。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 多能流能量管理研究:挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.

ation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.

[2] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.

[3] 刘沁哲,陈启鑫,卢恩,等. 考虑液化天然气供应风险的气电联合系统运行分析[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2831-2837.
LIU Qinzhe, CHEN Qixin, LU En, et al. Operational analysis for combined gas and electricity system considering the risk of LNG supply[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2831-2837.

[4] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Chaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.

[5] 张勇. 燃气管网的稳态分析与模拟[D]. 昆明:昆明理工大学, 2009.
ZHANG Yong. Steady state analysis and simulation of gas pipeline network[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2009.

[6] 江茂泽. 输配气管网的模拟与分析[M]. 北京:石油工业出版社, 1995.

[7] 周任军,肖钧文,唐夏菲,等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 61-67.
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61-67.

[8] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 110-116.
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.

[9] 张义斌. 天然气-电力混合系统分析方法研究[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2005.
ZHANG Yibin. Study on the methods for analyzing combined gas and electricity networks[D]. Beijing: China Academy of Electric Power Sciences, 2005.

[10] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.

[11] LIN X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 155-159.

[12] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2950.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2950.

[13] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6331-6340.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-

- gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(24): 6331-6340.
- [14] 艾小猛,方家琨,徐沈智,等. 一种考虑天然气系统动态过程的气电联合系统优化运行模型[J]. 电网技术,2018,42(2): 409-416.
AI Xiaomeng, FANG Jiakun, XU Shenzhi, et al. An optimal energy flow model in integrated gas-electric systems considering dynamics of natural gas system[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 409-416.
- [15] 卫志农,梅建春,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):41-47.
WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47.
- [16] 钟俊杰,李勇,曾子龙,等. 综合能源系统多能流准稳态分析与计算[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):22-30.
ZHONG Junjie, LI Yong, ZENG Zilong, et al. Quasi-steady-state analysis and calculation of multi-energy flow for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 22-30.
- [17] 马瑞,王大朔. 考虑天然气 $N-1$ 的多能流系统静态安全耦合分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(6):1627-1636,1859.
MA Rui, WANG Dashuo. Static security coupling analysis of multi-energy flow system considering natural gas system $N-1$ contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1627-1636, 1859.
- [18] 包铭磊,杨阳,丁一,等. 考虑天然气系统影响的电力系统连锁故障评估[J]. 电网技术,2019,43(1):41-49.
BAO Minglei, YANG Yang, DING Yi, et al. Assessment of cascading failures in power system considering effects of natural gas system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 41-49.
- [19] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 3-11.
- [20] 李璇. 海上石油平台的电力系统暂态稳定研究[D]. 天津:天津大学,2014.
LI Xuan. The analysis of electric system transient stability of the offshore oil platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [21] 袁英,高强生,魏纳. 气液混输管道管式段塞流捕集器设计原理及实践[J]. 石油矿场机械,2010,39(10):29-32.
YUAN Ying, GAO Qiangsheng, WEI Na. Design principle and practice of pipe slug flow catcher for gas-liquid mixed pipeline[J]. Petroleum Mine Machinery, 2010, 39(10): 29-32.
- [22] 于继来,王江,柳焯. 电力系统潮流算法的几点改进[J]. 中国电机工程学报,2001,21(9):88-93.
YU Jilai, WANG Jiang, LIU Zhuo. Improvements on usual load flow algorithms of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 88-93.
- [23] MARTINEZMARES A, FUERTESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [24] 杭乃善,姚元玺,窦婷婷,等. 基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2005,33(4):9-11.
HANG Naishan, YAO Yuanxi, DOU Tingting, et al. An algorithm of multi-balance bus based on rectangular coordinate current influx[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(4): 9-11.

作者简介:



孟庆伟

孟庆伟(1985—),男,山东青岛人,讲师,博士,主要研究方向为能源互联网建模与分析以及新能源电力系统分析、控制与评价(E-mail:mqw@upc.edu.cn);

管清爽(1995—),女,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网建模与分析(E-mail:z17050507@s.upc.edu.cn);

张丽霞(1978—),女,山东潍坊人,副教授,博士,主要研究方向为柔性输配电技术与电力电子综合负荷建模(E-mail:zhanglixia@upc.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Steady-state modeling and energy flow analysis of offshore multi-platform gas-electricity interconnection system

MENG Qingwei¹, GUAN Qingshuang¹, ZHANG Lixia¹, WANG Yansong¹, LI Qiang²

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. China National Petroleum Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: The coupling elements and steady-state model of offshore multi-platform gas-electricity interconnection system are different from those of traditional gas-electricity interconnection systems, so the steady-state modeling and energy flow analysis are carried out. The interconnection system model is developed, in which not only the gas network model, power grid model and the compressor and turbine generator of traditional gas-electricity interconnection system model are included, but also considering the characteristics of offshore multi-platform, the power to gas coupling process of offshore platform is proposed and its model is built. Based on the sequential energy flow algorithm, a multi-slack bus model that is adaptive to the multi-platform environment is adopted to analyze the energy flow. Finally, an actual offshore multi-platform gas-electricity interconnected system is taken as an example to verify the applicability and effectiveness of the proposed model.

Key words: offshore multi-platform; gas-electricity interconnected system; steady-state modeling; energy flow analysis; multi-slack bus

附录
附录 A

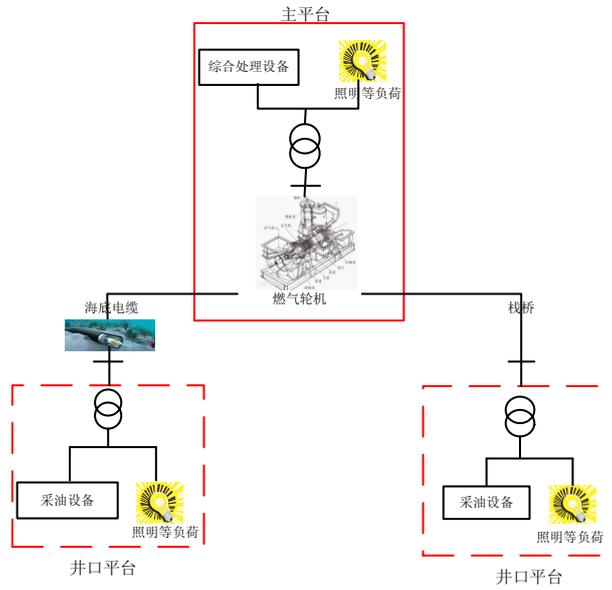


图 A1 主平台与井口平台间电能传输示意图
Fig.A1 Schematic diagram of power transmission between main platform and wellhead platform

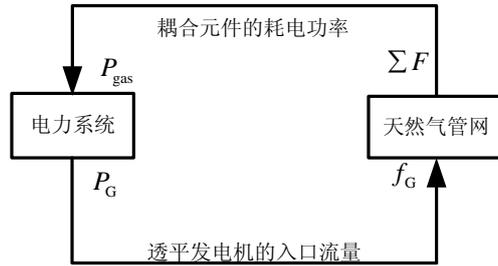


图 A2 气-电互联示意图
Fig.A2 Schematic diagram of gas-electricity interconnection

附录 B

表 B1 海底电缆参数

Table B1 Parameters of submarine cables

电压等级/kV	型号	电阻/ ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	感抗/ ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	容抗/ ($\text{M}\Omega \cdot \text{m}$)
35	S=3×120mm ²	0.189×10 ⁻³	0.14×10 ⁻³	21.802047
35	S=3×300mm ²	0.096×10 ⁻³	0.12×10 ⁻³	16.240300

表 B2 支路长度

Table B2 Length of branch

支路	长度/km
A-B	12.8
A-C	31
C-c	4.7

表 B3 三级压缩机参数

Table B3 Parameters of three-stage compressors

压缩机	入口压力 P_{in} /bar	出口压力 P_{out} /bar
高压压缩机	13.5	75.5
中压压缩机	4.5	14.5
低压压缩机	0.5	5.5