

电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真

卫志农,梅建春,孙国强,臧海祥,陈 胜,陈 霜

(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要: 考虑到气网的慢动态特性,研究了电-气互联综合能源系统的多时段暂态能量流仿真,其中电网采用稳态潮流模型,气网采用暂态能量流模型。运用隐式有限差分法将天然气系统暂态能量流方程转化为非线性代数方程组,然后用牛顿法求解以非线性代数方程组描述的综合能源系统的多时段暂态能量流方程。同时,计及了电力系统与天然气系统 2 个层面的耦合,即燃气轮机与电转气(P2G)技术。最后,基于修改的 IEEE 24 节点电力系统和比利时 20 节点天然气系统,计算其多时段暂态能量流。仿真结果表明,在短时间尺度研究中,天然气系统的稳态模型与暂态模型的计算结果存在显著差异。除此之外,还定量评估了 P2G 对风电消纳的积极影响。

关键词: 电-气互联综合能源系统; 电力系统; 天然气系统; 暂态能量流模型; 多时段暂态能量流仿真; 电转气; 风电消纳

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.006

0 引言

随着社会的发展和能源消耗的不断增加,化石能源短缺以及环境污染等问题不容忽视。为了解决能源利用的难题,美国学者杰里米·里夫金在其著作《第三次工业革命》中提出能源互联网(EI)这一概念^[1]。天然气作为一种清洁能源,具有储量丰富、高效环保等优点,在世界范围内得到大量开发。燃气轮机是电力系统和天然气系统传统的耦合元件,随着新型燃气轮机和联合循环燃气轮机的快速发展,电力系统和天然气系统之间的联系日趋紧密。近年来出现的电转气(P2G)技术为电力储能提供了新的方向,具有极大的应用前景,同时,该技术的使用也使电-气互联综合能源系统(IPGES)能量的双向流动成为可能^[2-3]。因此对 IPGES 的研究成为了 EI 发展的必然趋势^[1,4-5]。

目前,国内外对 IPGES 的研究尚处于起步阶段。文献[6]利用电力系统潮流的计算方法计算天然气系统能量流。文献[7-9]研究了 IPGES 的稳态能量流。电力系统和天然气系统之间的耦合导致电力对天然气系统的依赖性增强,文献[10]以此为背景,研究了天然气供应可靠性对电力系统的影响。文献[11]将电力系统概率潮流计算推广到 IPGES,进行综合能源系统的概率能量流分析。在文献[6]的基础上,文献[12]研究了 IPGES 的最优能量流,文献[13]提出了一种 IPGES 概率最优能量流模型,文献[14]对互联系统的最优调度进行了研究。然而,电

网与气网在动态时间尺度上存在显著差异,上述研究主要基于天然气系统稳态能量流模型,忽略了天然气管网慢过程的动态特性,可能导致计算结果偏离真实运行状态。文献[15]提出了一种暂态条件下,以最小化压缩成本为目标函数的有效调度方案。文献[16-17]计及了天然气管道的管存特性,建立了互联系统混合整数线性规划模型,以保证短期运行时的天然气能源供应充足。文献[18]研究了天然气系统暂态模型下 IPGES 的协调调度。

随着电力系统和天然气系统之间的耦合加深,一方面,天然气系统的不确定性对电力系统的稳定运行提出了挑战;另一方面,天然气系统对电力系统具有削峰填谷和辅助调频等积极作用,因此研究电力系统和天然气系统的联合仿真具有重要意义^[19-20]。与电力系统潮流计算类似,能量流计算是研究 IPGES 的基础,然而目前国内外研究主要基于天然气系统稳态能量流模型,鲜有对互联系统多时段暂态能量流的研究^[5]。因此,为了更准确地描述 IPGES 的真实运行状态,本文基于天然气网暂态模型,同时考虑能量的双向流动,即通过燃气轮机和 P2G 耦合电力系统和天然气系统,建立完整的 IPGES 暂态能量流模型。最后通过算例分析,验证了互联系统暂态能量流可以更准确地反映天然气系统的状态变化,并分析了电力系统和天然气系统之间的相互影响。

1 天然气系统暂态模型

天然气管网由许多元素构成,包括气源、负荷、管道、加压站、阀门和调压阀等^[7,15]。阀门和调压阀用于控制管道中天然气的流通或截止,本文假定天然气管网的拓扑结构一定,因此不考虑阀门和调压阀的作用。天然气大部分管网中还存在储气设施,

不同时刻其可以作为稳定的气源或负荷。天然气系统简单模型如图 1 所示。对天然气系统的建模,主要考虑 3 个方面:天然气管道流量、增压站和节点流量平衡方程^[6]。

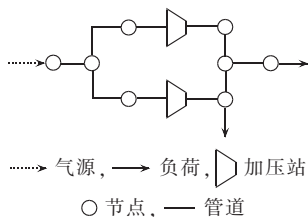


图 1 天然气系统简单模型

Fig.1 Simplified model of natural gas system

1.1 天然气管道流量

天然气管道流量与管道两端压力、管道物理特性、温度、天然气压缩因子等因素有关。天然气管道流量暂态模型由表征质量守恒、能量守恒和牛顿第二定律的偏微分方程描述,其中,假设管道天然气流量温度与环境温度相等,即不存在能量交换,因此能量守恒公式可以忽略^[15-18,21]。其具体描述如下:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial l} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial l} + G\rho \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{F\rho v|v|}{2D} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial l} = 0 \quad (2)$$

其中, l 为管道长度; t 为时间; ρ 为天然气密度; v 为天然气轴向流速; π 为天然气压力; G 为重力加速度; H 为高程; F 为摩擦因子; D 为管道内径。假设不同地区管道水平相同,即高程 H 相同,则式(2)中 $G\rho \partial H / \partial l$ 为 0。同时 $\partial(\rho v) / \partial t$ 和 $\partial(\rho v^2) / \partial l$ 对式(2)的影响可以忽略不计,故式(2)可转换为:

$$\frac{\partial \pi}{\partial l} + \frac{F\rho v|v|}{2D} = 0 \quad (3)$$

天然气压力可由式(4)表示。其中, Z 为天然气平均压缩因子; R 为气体常数; T 为管道中天然气平均温度。式(5)是由压力、密度和天然气轴向速度表示的天然气管道质量流 f ,其中 ρ_0 为标准条件下的天然气密度。

$$\pi = \rho ZRT \quad (4)$$

$$f = \pi D^2 \rho v / (4\rho_0) \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(1)和式(3),得:

$$K_1 \frac{\partial \pi_{l,t}}{\partial t} + \frac{\partial f_{l,t}}{\partial l} = 0 \quad (6)$$

$$K_2 \frac{\partial \pi_{l,t}^2}{\partial l} + f_{l,t}|f_{l,t}| = 0 \quad (7)$$

其中, $K_1 = \pi D^2 / (4RTZ\rho_0)$, $K_2 = \pi^2 D^5 / (16FRTZ\rho_0^2)$; $\pi_{l,t}$ 和 $f_{l,t}$ 分别为 t 时刻管道长度 l 处的压力和流量。

当连接节点 i 、 j 的管道分段为 1, $f_{l,t}$ 表示管道流量时,稳态情况下式(7)可简化为:

$$f_{ij,t} = S_{ij} \sqrt{\frac{K_2}{l}} \sqrt{S_{ij}(\pi_i^2 - \pi_j^2)} \quad (8)$$

式(8)即为稳态 Weymouth 公式, S_{ij} 表示管道流量的方向, $\pi_i \geq \pi_j$ 时为 1, $\pi_i < \pi_j$ 时为-1。

式(6)和式(7)为时空偏微分方程,描述了天然气管道气流的动态特性。由于显式方法仅仅是通过 t 时刻的变量值来求解 $t+1$ 时刻的数值,而隐式方法在计算 $t+1$ 时刻变量值的过程中综合考虑了 t 和 $t+1$ 时刻变量值的影响,所以本文在求解气网暂态能量流时,采用隐式有限差分法求解偏微分方程式(6)、(7)以保证数据精度^[18]。

天然气系统每条管道分为 N_p 段,则管道分段步长为 $\Delta l = l / N_p$,管道分段后的节点数为 $N_p + 1$ (包括两端节点)。假设时间步长为 Δt ,时间周期为 24 h,则有 $N_t = 24 / \Delta t$ 个时间点。将 0 时刻作为初始时刻,假定所有待求变量初值已知。偏微分方程式(6)、(7)差分后可由如下代数方程表示:

$$K_1 \frac{\pi_{l,t}^L - \pi_{l,t-1}^L}{\Delta t} + \frac{f_{l,t}^L - f_{l-1,t}^L}{2\Delta l} = 0 \quad l \in \{1, 2, \dots, N_p - 1\} \quad (9)$$

$$K_2 \frac{(\pi_{l,t}^L)^2 - (\pi_{l-1,t}^L)^2}{2\Delta l} + f_{l,t}^L |f_{l,t}^L| = 0 \quad l \in \{1, 2, \dots, N_p - 1\} \quad (10)$$

$$K_2 \frac{(\pi_{l,t}^L)^2 - (\pi_{l,t}^L)^2}{\Delta l} + f_{l,t}^L |f_{l,t}^L| = 0 \quad l = 0 \quad (11)$$

$$K_2 \frac{(\pi_{l,t}^L)^2 - (\pi_{l-1,t}^L)^2}{\Delta l} + f_{l,t}^L |f_{l,t}^L| = 0 \quad l = N_p \quad (12)$$

其中, $\pi_{l,t}^L$ 和 $f_{l,t}^L$ 分别为 t 时刻第 L 条管道长度为 l 处的压力和流量, $t \in \{1, 2, \dots, N_t\}$; $L \in \{1, 2, \dots, N\}$, N 为天然气管道数。

1.2 增压站

增压站简单模型如图 2 所示。

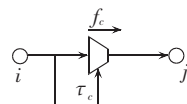


图 2 增压站简单模型
Fig.2 Simplified model of compression station

实际高压天然气管网中,管道摩擦和热交换导致的能量损耗会造成节点压力损失,影响天然气管道的传输能力,因而需要安装增压站来提高管道压力^[9]。增压站由燃气轮机、发动机和压缩机组成^[7],燃气轮机从增压站首端(或末端)汲取天然气为压缩机工作提供所需电能。近年来,欧洲部分国家为了达到温室气体减排的目标,开始使用直接由电网提供电能的压缩机替代传统的燃气驱动压缩机^[22]。压缩机消耗的能量为:

$$B_{HP} = B f_c \left[\left(\frac{\pi_j}{\pi_i} \right)^z - 1 \right] \quad (13)$$

其中, B_{HP} 为压缩机消耗的能量; f_c 为流经增压站 c 的流量; B 为与天然气温度、压缩机效率、天然气热值等有关的常量; z 为与天然气热值和天然气压缩因子有关的常量。

由消耗的能量 B_{HP} 可以计算消耗的天然气^[6]:

$$\tau_c = \alpha_k + \beta_k B_{HP} + \gamma_k B_{HP}^2 \quad (14)$$

其中, τ_c 为加压站 c 消耗的天然气流量; α_k 、 β_k 、 γ_k 为能量转换效率常数, 分别取为 0、0.0002、0。

加压站加压比 R_c 即为加压站末端与首端压力之比, 如式(15)所示, 且 $\pi_j \geq \pi_i$, 即对应的加压站流量必然从首端流向末端。

$$R_c = \frac{\pi_j}{\pi_i} \quad (15)$$

1.3 节点流量平衡方程

对于天然气系统任一节点 k , 其暂态模型中节点流量平衡方程表示为:

$$\sum_{i \in k} f_{i \rightarrow k}^{ik} + \sum_{c \in k} f_c^{k-source} + \sum_{c \in k} S_c f_c = \sum_{j \in k} f_{k \rightarrow j}^{kj} + \sum_{c \in k} f_c^{k-load} + \sum_{c \in k} \left(\frac{1-S_c}{2} \right) \tau_c \quad (16)$$

其中, $\sum_{i \in k} f_{i \rightarrow k}^{ik}$ 为与节点 k 相连的天然气源流量, 天然气源包括天然气井、P2G、储气设施等; $\sum_{j \in k} f_{k \rightarrow j}^{kj}$ 为与节点 k 相连的天然气负荷流量, 天然气负荷包括民用气、工业用气、燃气轮机和储气设施; S_c 为加压站流量的方向, 流入 k 节点为 1, 反之则为 -1; 管道支路流量 $\sum_{i \in k} f_{i \rightarrow k}^{ik}$ 为连接节点 i 、 k 的管道末端流量, $\sum_{j \in k} f_{k \rightarrow j}^{kj}$ 为连接节点 k 、 j 的管道首端流量^[18], 而稳态模型中管道分段为 1, 其首末端流量相等, 即稳态模型节点流量平衡方程中管道支路流量为整条管道的流量。

2 电力系统稳态模型

电磁波在电网中以光速传播, 因此电网的暂态时间常数比气网小, 所以在研究 IPGES 的暂态能量流仿真时, 电网可以采用稳态模型。通过潮流方程求解各节点电压幅值 U 、相角 θ , 继而可以求得电力系统潮流分布^[11]。对于节点 m , 有:

$$P_m = U_m \sum_{n \in m} U_n (G_{mn} \cos \theta_{mn} + B_{mn} \sin \theta_{mn}) \quad (17)$$

$$Q_m = U_m \sum_{n \in m} U_n (G_{mn} \sin \theta_{mn} - B_{mn} \cos \theta_{mn}) \quad (18)$$

$$P_{m, \text{gen}} - P_{m, \text{load}} - P_m = 0 \quad (19)$$

$$Q_{m, \text{gen}} - Q_{m, \text{load}} - Q_m = 0 \quad (20)$$

其中, P_m 和 Q_m 分别为节点 m 的有功和无功计算值; G_{mn} 和 B_{mn} 分别为支路 mn 的电导和电纳; U_m 和 U_n 分别为节点 m 和 n 的电压幅值; θ_{mn} 为节点 m 和 n 的电压相角差; $P_{m, \text{gen}}$ 和 $Q_{m, \text{gen}}$ 分别为节点 m 上的发电机及其他无功补偿装置发出的有功和无功; $P_{m, \text{load}}$ 和 $Q_{m, \text{load}}$ 分别为节点 m 上的有功和无功负荷。

3 电网与气网耦合模型

IPGES 的耦合元件包括燃气轮机和 P2G。燃气轮机中的能量是由天然气系统流向电力系统, P2G 中能量流方向与之相反。

3.1 燃气轮机

燃气轮机是 IPGES 中的重要耦合元件, 由天然气系统提供燃料, 发出功率并注入电力系统。和燃煤发电机相比, 燃气轮机具有热效率高、成本低、可靠性高和对环境影响小等优点^[10]。

本文对燃气轮机进行建模, 得到其消耗的天然气 e 与其发电量 P_G 呈如下关系^[14]:

$$e = M_1 + M_2 P_G + M_3 P_G^2 \quad (21)$$

其中, M_1 、 M_2 、 M_3 为天然气供应系数, 分别为 0、0.005 $\text{Mm}^3/(\text{D} \cdot \text{MW})$ 、0。

3.2 P2G 技术

由于风能和太阳能等新能源存在间歇性和可控性差等缺点, 实际并网时存在一定的“弃风”和“弃光”现象^[2]。在此背景下, P2G 的发展为新能源的消纳提供了契机。P2G 分为电转氢气和电转甲烷, 由于要考虑热能和反燃等问题, 天然气管网中注入的氢气在管道气体中所占比例存在一定的限制, 而注入甲烷不受该约束限制^[2, 23-25]。P2G 消耗的功率与天然气(甲烷)产量的一般关系式为:

$$f_{\text{P2G}} = P_P \frac{\mu_P}{H_G} \quad (22)$$

其中, f_{P2G} 为 P2G 产生的天然气流量; P_P 为消耗的功率; μ_P 为 P2G 的转换效率, 取 62%^[24]; H_G 为天然气热值。

4 多时段暂态能量流仿真

电力系统以节点电压幅值 U 和相角 θ 为状态变量, 天然气系统取节点压力、管道分段流量和压力以及流经加压站的流量作为状态变量。以稳态能量流计算结果作为初始时刻天然气系统各状态量初值。计算得下文天然气系统节点 1—20 压力初值分别为: 57.00、56.89、56.71、54.37、49.06、49.09、50.98、55.00、55.00、54.51、53.88、53.43、52.99、52.96、52.36、51.82、53.87、53.87、53.32、53.32 bar。计算得到管道流量初值, 连接节点 1—2 有 2 条管道, 管道流量初值均为 0.448 75 Mm^3/h ; 连接节点 2—3 有 2 条管道, 管道流量初值均为 0.464 58 Mm^3/h ; 连接节点 3—4、5—6、6—7、7—4、4—14 所对应的管道流量初值分别为 0.792 5、-0.023 33、-0.220 83、-0.375 42、0.417 08 Mm^3/h ; 连接节点 9—10 有 2 条管道, 管道流量初值分别为 0.411 67、0.050 42 Mm^3/h ; 连接节点 10—11 有 2 条管道, 管道流量初值分别为 0.411 67、0.050 42 Mm^3/h ; 连接节点 11—12、12—13、13—14、14—15、15—16、11—17、18—19、19—20 所对应的管道流量初值分别为 0.270 42、0.270 42、0.210 83、0.631 67、0.374 58、0.013 33、0.012 92、0.006 67 Mm^3/h 。计算得到连接节点 8—9、17—18 所对应的加压站流量初值分别为 0.817 43、0.089 21 Mm^3/h 。暂态模型下, 管道分段节点压力初值假设为两端节点

压力平方和在管道分段节点上的等差分布,管道分段节点流量初值假设与稳态管道流量相等。

综合能源系统暂态能量流计算等式如下:

$$\Delta M_1^t = K_1 \frac{\pi_{l,t}^t - \pi_{l,t-1}^t}{\Delta t} + \frac{f_{l+1,t}^t - f_{l-1,t}^t}{2\Delta l} = 0$$

$$t \in \{1, 2, \dots, N_T\}; l \in \{1, 2, \dots, N_P - 1\}; L \in \{1, 2, \dots, N\}$$
(23)

$$\Delta M_2^t = K_2 \frac{(\pi_{l+1,t}^t)^2 - (\pi_{l-1,t}^t)^2}{2\Delta l} + f_{l,t}^t |f_{l,t}^t| = 0$$

$$t \in \{1, 2, \dots, N_T\}; l \in \{1, 2, \dots, N_P - 1\}; L \in \{1, 2, \dots, N\}$$
(24)

$$\Delta M_3^t = K_2 \frac{(\pi_{l+1,t}^t)^2 - (\pi_{l,t}^t)^2}{\Delta l} + f_{l,t}^t |f_{l,t}^t| = 0$$

$$t \in \{1, 2, \dots, N_T\}; l = 0; L \in \{1, 2, \dots, N\}$$
(25)

$$\Delta M_4^t = K_2 \frac{(\pi_{l,t}^t)^2 - (\pi_{l-1,t}^t)^2}{\Delta l} + f_{l,t}^t |f_{l,t}^t| = 0$$

$$t \in \{1, 2, \dots, N_T\}; l = N_P; L \in \{1, 2, \dots, N\}$$
(26)

$$\Delta f_k = \sum_{i \in k} f_{i \rightarrow k}^{ik} + \sum_{c \in k} f_{k \rightarrow c}^{k-source} + \sum_{c \in k} S_c f_c -$$

$$\sum_{j \in k} f_{k \rightarrow j}^{kj} - \sum_{c \in k} f_c^{k-load} - \sum_{c \in k} \left(\frac{1 - S_c}{2} \right) \tau_c = 0$$

$$i, j, k \in \{1, 2, \dots, N_g\}; c \in \{1, 2, \dots, N_c\}$$
(27)

$$\Delta R_c = R_c - \frac{\pi_j}{\pi_i} = 0$$

$$c \in \{1, 2, \dots, N_c\}; i, j \in \{1, 2, \dots, N_g\}$$
(28)

$$\Delta P_m = P_{m,gen} - P_{m,load} - P_m = 0 \quad m \in \{1, 2, \dots, N_{PV} + N_{PQ}\}$$
(29)

$$\Delta Q_m = Q_{m,gen} - Q_{m,load} - Q_m = 0 \quad m \in \{1, 2, \dots, N_{PQ}\}$$
(30)

其中, N_g 为天然气管网节点数; N_c 为气网中加压站数量; N_{PV} 和 N_{PQ} 分别为电网中 PV 和 PQ 节点数; ΔM_1^t 、 ΔM_2^t 、 ΔM_3^t 、 ΔM_4^t 、 Δf_k 和 ΔR_c 为天然气系统误差向量; ΔP_m 和 ΔQ_m 为电力系统误差向量。

上述等式均为非线性代数方程组,故本文利用牛顿-拉夫逊法求解互联系统多时段暂态能量流,图 3 为其算法流程图。

对于某个时间断面,能量流仿真主要分为两部分:首先,计算电力系统潮流,根据潮流数据计算燃气轮机消耗以及 P2G 产生的天然气体积;然后,进行天然气系统能量流计算。每个时间断面的能量流计算所得结果作为下一时间断面的已知量,通过与时空有关的非线性代数方程组,完成时间周期内所有时间断面的能量流仿真。

5 算例分析

5.1 算例说明

本文采用如图 4 所示的修改的 IEEE 24 节点电力系统和比利时 20 节点高压天然气系统构造 IPGES 进行算例分析。图中,燃气机组接在电力系统的节

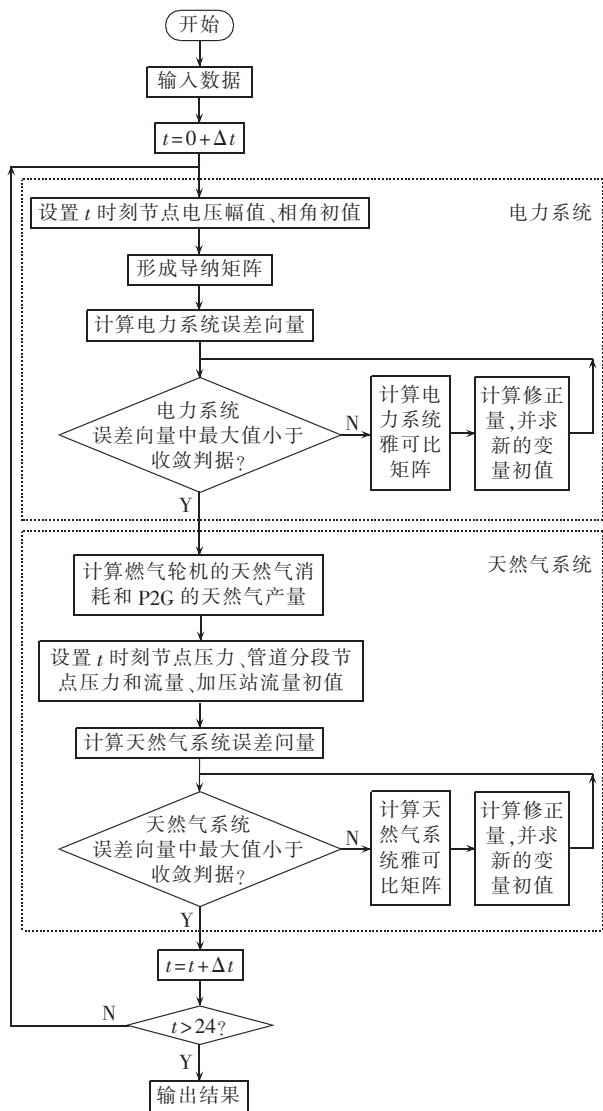


图 3 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真流程图

Fig.3 Flowchart of multi-period transient energy-flow simulation for IPGES

点 1、13、22 上,燃煤机组接在电力系统的节点 2、7、16、18、21、23 上,天然气系统中的实线、虚线分别表示高压、低压天然气。IEEE 24 节点电力系统具体参数由 Matpower 4.1 提供,比利时 20 节点天然气系统参数参考文献[26]。图 4 中,假设在电力系统节点 13、22 和 1 上通过燃气轮机分别和天然气系统节点 5、6 和 14 互联,电力系统节点 6、17 上均接有容量为 800 MW 的风电机组,同时节点 6 和 17 通过 P2G 分别与天然气系统节点 13 和 10 相连。风电出力、电力负荷和天然气负荷 24 h 曲线如图 5 所示。

5.2 暂、稳态能量流对比分析

首先,不考虑天然气系统和电力系统之间的耦合,假设在天然气系统暂态和稳态模型下天然气管网不同时段的气源及负荷相同,然后计算天然气系统在文献[13]中采用的稳态模型和本文建立的暂态模型下的多时段能量流并进行对比,天然气管网节点 5 在暂、

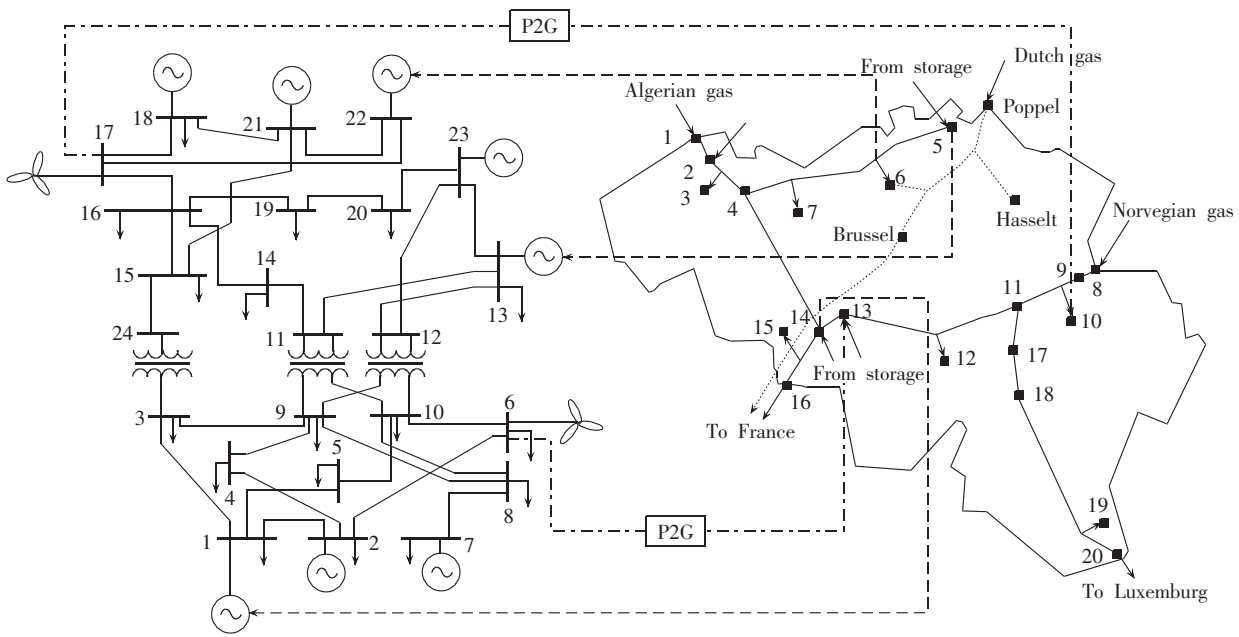


图 4 IEEE 24 节点电力和比利时 20 节点天然气互联系统
Fig.4 IPGES of IEEE 24-bus power system and Belgian 20-node gas system

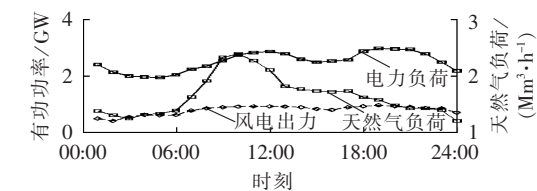


图 5 不同时段风电出力、电力负荷和天然气负荷
Fig.5 Daily wind power,electricity load and gas load

稳态模型下不同时段压力值对比如图 6 所示。

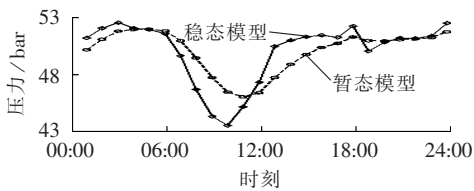


图 6 天然气节点 5 在暂态和稳态模型下的压力
Fig.6 Pressures of gas node 5 calculated by steady-state and transient models

天然气管网节点 5 的压力在 2 种模型下具有相似的时间变化趋势,但相比稳态模型,暂态模型下的气网节点压力时间变化曲线更为平缓。这是由于在暂态模型中,管道的管存特性平抑了部分天然气负荷的波动。理论上,如果时间步长 Δt 和管道分段步长 Δl 取足够小,则计算结果更符合实际情况,但相应的计算量会显著增大,计算时间会增长。

5.3 风电消纳定量评估

风功率的大范围波动可能导致支路容量或节点电压幅值越限,而 P2G 可以将电网难以消纳的风电转化为天然气存储到气网中,减小风电并网对电网安全性的影响。

不同时段电压幅值(标幺值)和支路输电能力

的变化情况分别如图 7 与图 8 所示。由图 7、8 可知,在 08:00—24:00 时间段内,风电接入导致节点 6 电压幅值接近或超过其上限(1.05 p.u.),而 P2G 的接入有效降低了其电压幅值;对于支路 17-16,风电接入导致其支路输电能力越限(500 MV·A),配置 P2G 后有效缓解了输电阻塞问题,促进了新能源的消纳,避免了电网的不安全运行。

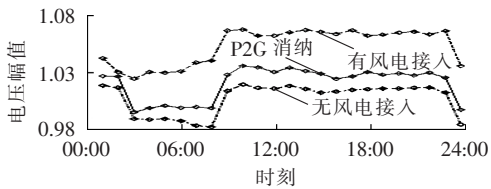


图 7 风电和 P2G 对电力节点 6 电压的影响
Fig.7 Effects of wind power and P2G on voltage of power bus 6

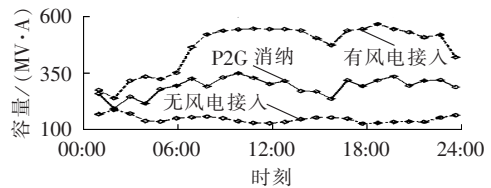


图 8 风电和 P2G 对电力支路 17-16 输电能力的影响
Fig.8 Effects of wind power and P2G on transmission capacity of power branch 17-16

5.4 风电波动对天然气系统的影响

燃气轮机具有经济性和高可靠性等优点,当电力系统出现波动时,天然气系统可以通过燃气轮机对电力系统进行快速调节。以风电为例,由于风电具有较强的不确定性,当风电波动时,通过调节燃气轮机发电量可以使电力系统保持平衡。假设节点 6 上风电机组在 06:00 和 17:00 所发功率小于预期值,

在 12:00、13:00 和 21:00 高于其预期值,调节燃气轮机所发功率,得到有、无风电波动对天然气系统的影响如图 9 所示。

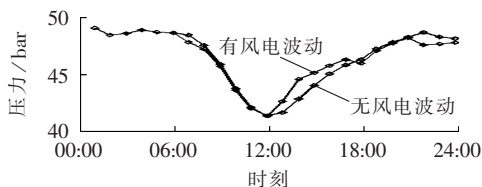


图 9 风电波动时天然气节点 5 压力变化

Fig.9 Pressure variations of gas node 5, with and without wind-power fluctuation

燃气轮机是电力系统的电源,同时也是天然气系统的负荷。当风电出力小于预期值时,为了保证电力系统电源出力和负荷的平衡,燃气轮机需要增加出力,气网负荷增加,由图 9 可知,天然气管网节点压力降低;当风电出力高于其预期值时,燃气轮机减小出力以保证电力系统的稳定运行,此时天然气负荷减小,天然气系统节点压力增大。

6 结论

考虑到电力系统和天然气系统动态时间尺度差异较大,本文基于天然气系统暂态模型和电力系统稳态模型,以燃气轮机和 P2G 耦合电力系统和天然气系统,研究了 IPGES 多时段暂态能量流的仿真,有望为综合能源系统后续的规划、运行与控制奠定基础。通过算例分析可得如下结论:

a. 相比于天然气系统稳态模型,天然气系统暂态模型下的能量流仿真可以更准确地描述天然气系统的实时运行状态;

b. P2G 对风电消纳具有积极作用,缓解了输电线路阻塞问题,从而保证了电力系统的安全运行;

c. 电力系统中的随机性(特别是间歇性风电的随机性)通过燃气轮机传播至天然气系统,从而对天然气系统的安全经济运行造成影响,因而在综合能源系统运行规划与实时调度中,需充分计及不确定因素的影响。

随着燃气轮机所占比例的提高,天然气供应对电力系统稳定性的影响逐渐加强,天然气网络故障等不确定因素可能导致部分机组停运,电力系统失去平衡。后续将针对这些问题,以 IPGES 暂态模型为基础,建立安全约束模型,进行事故分析。

参考文献:

[1] 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 Zhaoyang,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.

[2] 王业磊,赵俊华,文福拴,等. 具有电转气功能的多能源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):1-10,65.
WANG Yelei,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Market equilibrium of multi-energy system with power-to-gas functions[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(21):1-10,65.
[3] 王璟,王利利,林济铿,等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):1-10.
WANG Jing,WANG Lili,LIN Jikeng,et al. Energy internet morphology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(4):1-10.
[4] 张勇军,陈泽兴,蔡泽祥,等. 新一代信息能源系统:能源互联网[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):1-7.
ZHANG Yongjun,CHEN Zexing,CAI Zexiang,et al. New generation of cyber-energy system:energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):1-7.
[5] 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.
[6] LI Q,AN S,GEDRA T W. Solving natural gas load flow problems using electric load flow techniques[C]//Proc of the North American Power Symposium. Rolla,USA:[s.n.],2003:1-7.
[7] 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 Electric Power Research Institute,2005.
[8] MARTINEZ-MARES A,FUERTE-ESQUIVEL C R. Integrated energy flow analysis in natural gas and electricity coupled systems[C]//North American Power Symposium (NAPS). Boston,MA,USA:IEEE,2011:1-7.
[9] MARTINEZ-MARES A,FUERTE-ESQUIVEL 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.
[10] MUNOZ J,JIMENEZ-REDONDO N,PEREZ-RUIZ J,et al. Natural gas network modeling for power systems reliability studies[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference. Bologna,Italy:IEEE,2003:1-8.
[11] 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.
[12] AN S,LI Q,GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow[C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference. Dallas,TX,USA:IEEE,2003:138-143.
[13] 孙国强,陈霜,卫志农,等. 计及相关性的电-气互联系统概率最优潮流[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):11-17.
SUN Guoqiang,CHEN Shuang,WEI Zhinong,et al. Probabilistic optimal power flow of combined natural gas and electric system considering correlation[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(21):11-17.
[14] UNSIHUAY C,LIMA J W M,SOUZA A C Z D. Modeling the

- integrated natural gas and electricity optimal power flow[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA:IEEE,2007:1-7.
- [15] MAK T W K,HENTENRYCK P V,ZLOTNIK A,et al. Efficient dynamic compressor optimization in natural gas transmission systems[C]//IEEE American Control Conference. Boston,MA, USA:IEEE,2016:7478-7483.
- [16] CHAUDRY M,JENKINS N,STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimization[J]. Electric Power Systems Research,2008,78(7):1265-1279.
- [17] CORREA-POSADA C M,SANCHEZ-MARTIN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(6):3347-3355.
- [18] LIU C,SHAHIDEHPOUR M,WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos,2011,21(21):599-606.
- [19] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统和能源互联网简介[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.
YU Xiaodan,XU Xianrong,CHEN Shuoyi,et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(1):1-13.
- [20] SHAHIDEHPOUR M,FU Y,WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems[J]. Proceedings of the IEEE,2005,93(5):1042-1056.
- [21] NOORBEHESHT N,GHASEMINEJAD P. Numerical simulation of the transient flow in natural gas transmission lines using a computational fluid dynamic method[J]. American Journal of Applied Sciences,2013,10(1):24-34.
- [22] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):1-7.
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(5):1-7.
- [23] QADRAN M,ABEYSEKERA M,CHAUDRY M,et al. Role of power-to-gas in an integrated gas and electricity system in Great Britain[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2015,40(17):5763-5775.
- [24] HEINISCH V,LE A T. Effects of power-to-gas on power systems:a case study of Denmark[C]//IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015. Eindhoven,Netherlands:IEEE,2015:1-6.
- [25] 王一家,董朝阳,徐岩,等. 利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3586-3595.
WANG Yijia,DONG Zhaoyang,XU Yan,et al. Enabling large-scale energy storage and renewable energy grid connectivity:a power-to-gas approach[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3586-3595.
- [26] WOLF D D,SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm[J]. Management Science,2000,46(46):1454-1465.

作者简介:



卫志农

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化(E-mail:wzn_nj@263.net);

梅建春(1994—),男,安徽天长人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统(E-mail:humeijianchun@163.com);

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与运行控制(E-mail:hhusunguoqiang@163.com)。

Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system

WEI Zhinong,MEI Jianchun,SUN Guoqiang,ZANG Haixiang,CHEN Sheng,CHEN Shuang

(College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China)

Abstract: The multi-period transient energy-flow simulation of IPGES(Integrated Power and Gas Energy System) is researched,which adopts the transient energy-flow model for the natural gas system to consider its slow dynamic characteristics while the steady-state power-flow model for the power system. The implicit finite difference method is applied to convert the transient energy-flow equation of natural gas system into the nonlinear algebraic equations and the Newton method is applied to solve the nonlinear algebraic equations which are used to describe the integrated energy system in the multi-period transient energy-flow simulation. The coupling between power system and gas system is considered at two aspects:gas turbine and P2G(Power-to-Gas) technology. The multi-period transient energy-flows are calculated for an IPGES consisting of the modified IEEE 24-bus power system and the Belgian 20-node natural gas system,and the simulative results show there are significant differences between the gas system energy-flows on short-time scale calculated by the steady-state model and those by the transient model. The positive effect of P2G on the wind-power accommodation is quantitatively assessed.

Key words: integrated power and gas energy system; electric power systems; natural gas system; transient energy-flow model; multi-period transient energy-flow simulation; power-to-gas; wind-power accommodation