

计及输气系统延时特性的电-气互联系统 可用输电能力计算

陈厚合¹, 尚聪¹, 王丹², 李思源², 姜涛¹

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:电-气互联系统中燃气轮机发电比重以及天然气网络规模不断增大, 而传统电力系统可用输电能力(ATC)计算方法未考虑天然气系统的传输延时特性, 为此, 研究计及输气系统延时特性的电-气互联系统ATC计算。采用等间隔采样法表示延时的动态变化过程, 计算不同时刻采样点天然气网节点压力以及燃气轮机进气量的边界值, 将燃气轮机进气量转换为发电出力上限, 求解出变化过程中不同时刻的稳态ATC值。为提高计算效率, 采用基于二分法原理的自适应步长法(ASBM)对ATC进行求解, 以运行点与安全域边界的距离为依据, 确定下一个预测运行点的位置。算例分析表明天然气系统的延时特性可以提高系统ATC值, 且验证了采用ASBM求解ATC的高效性。

关键词:可用输电能力; 能源互联网; 能源互联; 天然气网延时特性; 二分法; 自适应步长

中图分类号: TM 711

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.201908043

0 引言

以煤等不可再生燃料作为一次能源的传统发电机组对环境污染大, 难以满足人们对环保、低碳社会的发展要求。相比煤炭而言, 天然气储量丰富、易于存储且高效环保, 其在发电侧的比例逐渐增加^[1], 从而电力系统与天然气系统的耦合不断加强^[2]。同时, 随着电转气技术的成熟, 可以将电能转换为天然气进行存储和输送^[3-4], 从而为太阳能、风能等间歇性可再生能源的消纳提供保障, 更深层次地加深电力系统与天然气系统的耦合, 因此, 电-气互联系统已经成为研究热点, 电-气互联系统中电网的可用输电能力ATC(Available Transfer Capability)计算得到广泛的关注。

目前, 国内外学者对电-气互联系统进行了大量研究。文献[5-6]从潮流计算的角度, 分析了电-气互联系统的能量流, 计及了电力系统与天然气系统之间的燃气轮机耦合。文献[7]采用蒙特卡洛法分析了电-气互联系统的可靠性, 并总结出更大的储气容量有助于提高整个互联系统的稳定性。文献[8]将概率潮流的概念推广到电-气混联综合能源系统的概率能量流中。文献[9-10]构建了电力-天然气系统互联模型和优化框架, 借鉴电力系统稳态分析方法对天然气系统进行类似分析。文献[11]针对电-气能源市场价格的不确定性, 以燃气轮机的实体运营者利润最大为优化目标, 提出一种随机规划模型。

ATC衡量了在满足电力系统安全约束的基础

上, 互联电网不同区域间的功率交换能力。文献[12]提出考虑元件长期载荷容许的快速计算方法。ATC的计算结果对于电力市场的买卖双方至关重要, 同时也可用于电力系统的规划和安全稳定评估^[13]。ATC的求解方法主要包括直流潮流法^[14]、重复潮流法、最优潮流法和连续潮流法^[15]。

然而以上研究没有考虑电、天然气二者在传输速度上的差异, 即网络的动态特性对系统的影响。其适用于在较小的区域内建模分析, 此时网络的动态特性对系统的影响较小。而当系统的规模较大时, 对耦合系统动态分析的研究尚不完善, 需进一步探索。针对天然气网的动态特性, 目前也已有诸多研究, 文献[16]在电-气互联系统中计及了天然气网络的动态过程, 证明了稳态模型忽略管道存储能力及天然气慢传输特性, 将会导致不准确的调度方案。文献[17]进一步计及天然气网管存的线性模型, 证明了管存容量对能源供应充裕度的重要作用。上述文献均通过对天然气网动态特性建模, 证明了慢动态特性可提高系统运行可靠性, 说明天然气网的慢动态特性会对网络的状态产生一定的影响。但目前的研究都是从暂态层面展开, 计算量大, 没有从稳态层面计及延时的影响。

综上所述, 本文研究计及天然气传输延时的电-气互联系统ATC的计算, 构建天然气管道延时特性的模型; 采用等间隔采样法分析天然气网络延时通过耦合元件对ATC的影响; 同时考虑到求解速度的问题, 在传统连续潮流的基础上构建基于二分法原理的自适应步长法ASBM(Adaptive Step Bisection Method), 更加高效地计算ATC值; 以比利时20节点

天然气系统和IEEE 39节点电力系统耦合而成的电-气互联系统验证了在天然气网负荷发生变化时,考虑天然气系统的延时特性可以增大ATC,增加电网区域间的能量传输能力,同时也验证了ASBM的高效性。

1 电-气互联系统建模

1.1 天然气系统建模

天然气系统与电力系统具有一定的相似之处:第一,能源由供应者经远距离输送,最终至能源的消费者;第二,能源输送的方向,即为节点状态量(电压或压力)下降的方向;第三,网络中每个节点流入与流出的能量相等;第四,为保障能源的安全、可靠供应,系统的运行状态需要处于安全域之内。

由于2个网络的相似之处,可采取求解电力潮流的方法来分析天然气系统的潮流分布情况。在对天然气系统建模时将管道分为2个部分:一部分为普通的管道支路,另一部分为压缩机支路。

对于天然气系统中的普通管道 mn ,其流量 F_{mn} 为:

$$F_{mn} = k_{mn} \sqrt{s_{mn} (\pi_m^2 - \pi_n^2)} \quad (1)$$

$$s_{mn} = \begin{cases} 1 & \pi_m - \pi_n \geq 0 \\ -1 & \pi_m - \pi_n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, π_m 、 π_n 分别为节点 m 和 n 的压力; k_{mn} 为与管道内径、长度、效率、压缩因子等相关的常数; s_{mn} 反映了管道流量的方向。

由式(1)可知,天然气的输送方向,即为节点压力下降方向。为增强网络的输气容量,天然气系统一般配置一定数量的加压站。加压站通过压缩机提高压力,需要消耗额外的能量。当压缩机由燃气轮机驱动时,燃气轮机消耗的天然气可等效为加压站的气负荷,且主要由升压比以及流过加压站的流量决定:

$$H_{com,k} = B_k F_{com,k} \left[\left(\pi_m / \pi_n \right)^{Z_k} - 1 \right] \quad (3)$$

$$\tau_{com,k} = \alpha + \beta H_{com,k} + \gamma H_{com,k}^2 \quad (4)$$

其中, $F_{com,k}$ 为流过加压站 k 的流量; $H_{com,k}$ 为压缩机消耗的电能; B_k 和 Z_k 为常数, B_k 取决于压缩机温度、效率, Z_k 取决于压缩机因子; $\tau_{com,k}$ 为燃气轮机消耗的天然气流量; α 、 β 、 γ 为能量效率转换常数。

压缩机由燃气轮机驱动的示意图如图1所示。

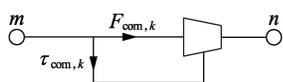


图1 燃气轮机驱动的加压站

Fig.1 Compressor driven by gas turbine

天然气系统各节点流量平衡方程为:

$$F_{sup,m} - F_{load,m} = \sum_n F_{mn} + \sum_k \text{sgn}(m, n) F_{com,k} + \sum_k \tau_{com,k} \quad (5)$$

$$\text{sgn}(m, n) = \begin{cases} 1 & m \text{ 为加压站的入口} \\ -1 & m \text{ 为加压站的出口} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $F_{sup,m}$ 和 $F_{load,m}$ 分别为节点 m 天然气的供应量与负荷量。

1.2 电力系统建模

电力系统采用传统交流极坐标形式的模型,表示如下:

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $P_{G,i}$ 和 $Q_{G,i}$ 分别为发电机有功出力和无功出力; $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 分别为负荷有功、无功功率; V_i 、 V_j 和 θ_{ij} 分别为节点电压幅值与相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳。

1.3 电力系统与天然气系统的耦合元件建模

燃气轮机连接了一次能源(天然气)网络与二次能源(电力)网络,燃气轮机消耗天然气,输出电功率。因而对于天然气系统而言,燃气轮机是负荷;而对于电力系统而言,它是电源。在电-气互联能源系统中,燃气轮机消耗的天然气流量与输出电功率呈如下关系:

$$\begin{cases} H_{g,i} = \alpha_{g,i} + \beta_{g,i} P_{G,i} + \gamma_{g,i} P_{G,i}^2 \\ F_{load,m}^{G,i} = \frac{H_{g,i}}{V_{CH}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $F_{load,m}^{G,i}$ 为天然气系统节点 m 等效负荷(为供应节点 i 的燃气轮机); $H_{g,i}$ 为燃气轮机输入的热量值; V_{CH} 为高热值; $\alpha_{g,i}$ 、 $\beta_{g,i}$ 、 $\gamma_{g,i}$ 由燃气轮机的耗热率曲线决定。

2 考虑天然气网延时特性的ATC计算

2.1 天然气网的延时特性

在天然气管网的传输中,由于天然气的慢特性与管道的长度影响,通常会有数分钟至数小时的延迟,因此一段输气管道首末端的流量不同。其延时模型如图2所示。图中, σ 为延时时长; t_0 为天然气系统负荷发生变化的初始时刻; $f_m^{t_1}$ 、 $p_m^{t_1}$ 、 $v_m^{t_1}$ 分别为 t_1 时刻入口流量、入口压力和入口流速; $f_n^{t_2}$ 、 $p_n^{t_2}$ 、 $v_n^{t_2}$ 分别为 t_2 时刻出口流量、出口压力和出口流速; D_{mn} 为管段直径; L_{mn} 为管道长度。

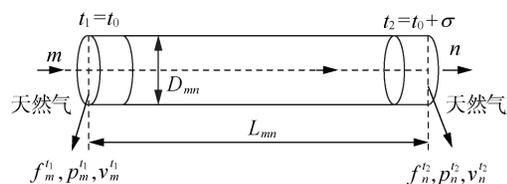


图2 天然气管网

Fig.2 Natural gas pipe network

在日内调度的过程中,第*i*个调度时刻和第*i*+1个调度时刻之间的时间间隔通常在0.5~1 h之间,则延时的时间不可忽略,因此常规的稳态潮流计算方法不再适用。

当网络运行状态改变时,相较于2个稳态,2个稳态之间的变化过程是计算ATC时着重考虑的。假设流量的变化是线性的,管道平均流量即为首末流量均值。则管道在2个状态之间对应的延时 σ 计算如下:

$$\sigma = \pi (L_{mn} D_{mn}^2 / 4) / [(f^i + f_s^{i+1}) / 2] + \sigma' \quad (9)$$

其中, f^i 为管道在考虑延时下第*i*个时间节点的已有流量; f_s^{i+1} 为管段在第*i*+1个时间节点的稳态流量; σ' 为管段*mn*所连接流入的上一个管段的延时值,如果有多个管道流入节点*m*,则 σ' 为多个管道延时的平均值。

2.2 基于ASBM的电-气互联系统的ATC计算

在满足网络安全约束的条件下,ATC为不同区域间功率交换的最大值。基于ASBM求解电-气互联系统ATC的数学模型可表示如下。

(1)优化目标:

$$\max \lambda \quad (10)$$

(2)等式约束:

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ P_{G,i} = P_{G,i}^0 + K_{G,i} \lambda \\ P_{L,i} = P_{L,i}^0 + K_{P,i} \lambda \\ Q_{L,i} = Q_{L,i}^0 + K_{Q,i} \lambda \end{cases} \quad (11)$$

其中, λ 为可变的负荷因子,其物理含义为不同区域间的功率交换值; $K_{G,i}$ 、 $K_{P,i}$ 、 $K_{Q,i}$ 分别为发电机有功出力、负荷有功、负荷无功的功率增长方向;上标0表示初始值。

(3)不等式约束。

a. 天然气系统约束。

在计及延时的情况下节点压力是不同于稳态的,计算如下^[18]:

$$\pi_{out_td}^{i+1} = \frac{\Delta t}{\sigma_1} (\pi_{out_steady}^{i+1} - \pi_{out_td}^i) + \pi_{out_td}^i \quad (12)$$

其中, $\pi_{out_td}^i$ 、 $\pi_{out_td}^{i+1}$ 分别为管道在第*i*、*i*+1个时间节点的出口延时压力值; $\pi_{out_steady}^{i+1}$ 为管道在稳态下第*i*+1个时间节点的出口压力值; Δt 为延时过程中某一时刻与延时起点之间的时间间隔; σ_1 为向节点*n*注入天然气的所有管道延时的最大值。

与电力系统相似,天然气系统的实时运行状态也处于某个稳定安全区域内。天然气系统的安全约束主要包括节点压力约束、管道流量约束、节点供应

约束,即:

$$\begin{cases} \pi_m^{\min} \leq \pi_{m,t} \leq \pi_m^{\max} \\ F_{mn,t} \leq F_{mn}^{\max} \\ F_{sup,m}^{\min} \leq F_{sup,m,t} \leq F_{sup,m}^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

其中, π_m^{\max} 和 π_m^{\min} 分别为节点压力约束的上、下限; F_{mn}^{\max} 为管道输送流量的最大值; $F_{sup,m}^{\max}$ 和 $F_{sup,m}^{\min}$ 分别为气源流量供应约束的上、下限; $\pi_{m,t}$ 为延时过程中*t*时刻节点*m*的压力值; $F_{mn,t}$ 为管道*mn*在*t*时刻的流量; $F_{sup,m,t}$ 为气源在*t*时刻的出力。

b. 电力系统约束:

$$P_{G,n(t)}^{\max} = k_1 \sum_{m=1}^N k_{mn} s_{mn} \sqrt{s_{mn} (\pi_{m,t}^2 - \pi_{n,t}^2)} \quad (14)$$

$$\begin{cases} V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} \\ GT: P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max} \\ G: P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

其中, V_i^{\max} 和 V_i^{\min} 分别为节点电压幅值约束的上、下限; S_{ij}^{\max} 为支路视在功率约束上限; G 表示燃煤机组; GT 表示燃气轮机; $P_{G,i}^{\max}$ 和 $P_{G,i}^{\min}$ 分别为发电机有功出力约束的上、下限; k_1 为燃气轮机消耗的天然气与发出电功率之间的比例关系; $\pi_{n,t}$ 为延时过程中*t*时刻节点*n*的压力值; $P_{G,n(t)}^{\max}$ 、 $P_{G,n(t)}^{\min}$ 分别为延时过程中*t*时刻燃气发电机*n*的出力上、下限; N 为与节点*n*相连的节点数。

(4)采用ASBM计算ATC,流程图如图3所示。

$$P_{K+1} = P_K + (P_{\max} - P_{\min}) \min \left(\frac{A_{\max} - A_N}{A_{\max} - A_{\min}} \right) \quad (16)$$

$$P_{K+1} = P_K - (P_{\max} - P_{\min}) \min \left(\frac{A_N - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \right) \quad (17)$$

以矢量 $\mathbf{A} = (A_1, A_2, \dots, A_i)$ 表示系统中所有状态变量的值,其中 A_i 为第*i*个状态变量的值; A_{\max} 为系统负荷增量为 P_{\max} 时的系统状态变量值; A_{\min} 为系统负荷增量为 P_{\min} 时的系统状态变量值; A_N 为系统在安全域边界时系统状态变量的值; A_K 、 A_{K+1} 分别为第*K*、*K*+1次计算的系统状态变量值; P_K 、 P_{K+1} 分别为第*K*、*K*+1次系统负荷增量值;系统的总负荷增量值区间为 $[P_{\min}, P_{\max}]$, P_{\max} 为二分区间的右端点值,初值是按照给定的功率增长方向将发电机的出力增长到上限(此时系统运行在安全约束边界外),得到一个发电机的总的功率增量值,即总的负荷增量值, P_{\min} 为二分区间左端点值,初值为系统运行在基态时的负荷总增量值,等于0。

采用ASBM计算ATC的几何示意图如图4所示。图中 P^* 为系统的ATC准确值。曲线表示随着负荷的增加系统运行状态距离安全域边界距离的变化情况。由前文可知,第1次计算可得到负荷增量

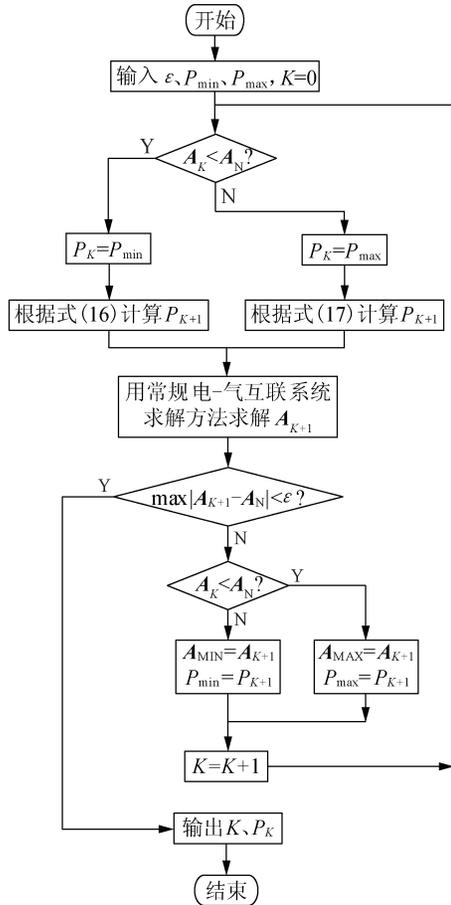


图3 ASBM 流程

Fig.3 Flowchart of ASBM

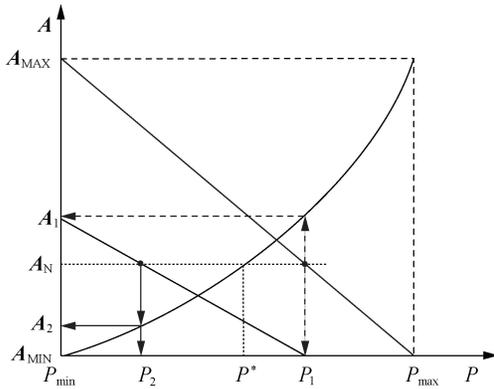


图4 采用 ASBM 计算 ATC 的几何示意图

Fig.4 Schematic diagram of ATC calculation by ASBM

区间为 $[P_{\min}, P_1]$, 其对应的系统状态变量值为 A_1 ; 第 2 次计算得到的系统负荷增量区间为 $[P_2, P_1]$, 对应的系统状态变量值为 A_2 ; 重复上述过程, 可使系统状态变量值不断趋近系统安全域边界, 直至达到精度要求, 此时负荷增量值为系统不同区域间的 ATC 值。

2.3 考虑延时的 ATC 计算过程

考虑天然气网的延时之后, 从稳态 A 到稳态 B 的过程中, 网络状态变量值与稳态有所不同, 因此对 ATC 的大小有一定影响。在负荷需求变动后, 每隔

5 min 计算对应的 ATC 值, 即从稳态 A 结束的时间节点开始, 计算 5、10、15 min 等时间节点的 ATC 值, 直到达到稳态 B 为止。具体算法流程如图 5 所示。

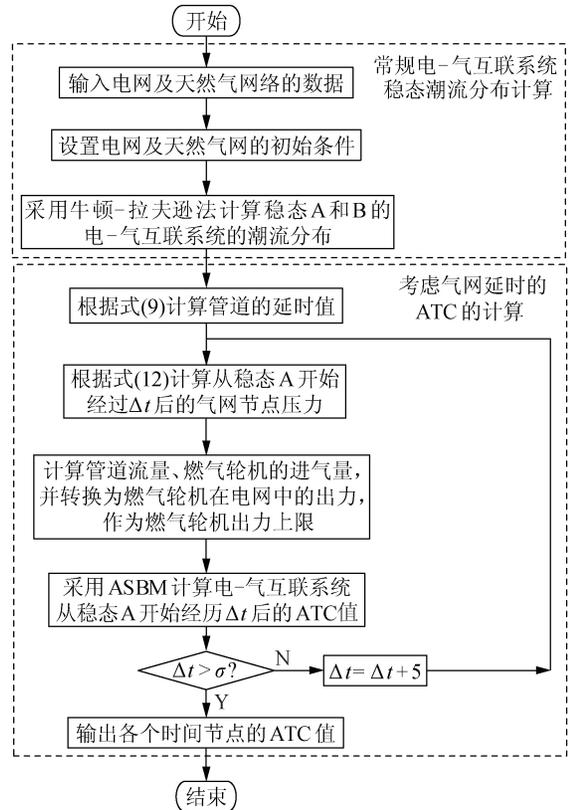


图5 考虑天然气网延时的 ATC 计算流程

Fig.5 Flowchart of ATC calculation considering gas network delay

本文所研究的是从稳态层面考虑天然气网延时对 ATC 的影响, 采用等时间间隔抽样的方法计算不同时刻的 ATC 值, 抽取不同时刻气网节点压力值计算管道中的天然气流量, 从而计算出燃气轮机的出力上限值, 再进行 ATC 的计算。第 $i+1$ 个取样点的气网节点压力值是根据第 i 个取样点的气网节点压力值进行计算的, 因此, 第 $i+1$ 个取样点的燃气轮机出力上限与第 i 个取样点的燃气轮机出力上限不是互相独立的, 第 $i+1$ 个取样点的 ATC 值与第 i 个取样点的 ATC 值也不是互相独立的。由上述可知, 2 个不同断面的 ATC 之间是通过天然气网 2 个不同状态间的耦合关系而耦合到一起的。

3 天然气网延时特性对电网区域间电能传输的影响

ATC 为不同区域间功率交换的最大值, 在得到 ATC 值时电-气互联系统的运行点已经到达安全边界, 如图 6 中 H 点所示。

天然气网的负荷发生变化时, 若不考虑延时, 天然气网的安全约束边界会立即从边界 1 变为边界 2, 系统的运行点也必须从 H 点立刻变到 K_1 点, 否则系

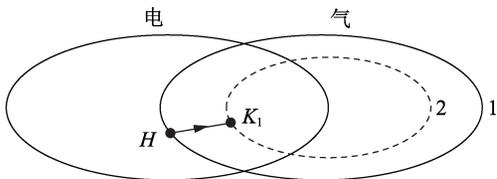


图6 天然气网延时对电-气互联系统安全边界的影响
Fig.6 Impact of gas network delay on security boundary of integrated electricity and natural-gas systems

统不能安全运行。此时以新的天然气网安全约束边界2以及电网的安全约束边界作为约束条件计算ATC,从而ATC值也会立即变为一个新的值。如果考虑延时,天然气网的安全约束边界从边界1变为边界2是一个连续的过程,系统运行点从H点到达K₁点也是一个连续的过程,此时以天然气网的安全约束边界2以及电网的安全约束边界作为约束条件计算ATC,从而ATC值也是连续变化的。

在上述考虑天然气网延时计算ATC的过程中,ATC是随时间连续变化的。从稳态A到达稳态B这一时间段,考虑延时与不考虑延时的ATC值不同,从而这一时段传输的能量也会有所差异。计算公式为:

$$W = \int_0^T \Delta P dt \quad (18)$$

其中,W为考虑延时情况多输送的电能;T为系统从一个稳态到达另一个稳态的时间; ΔP 为每一时刻考虑延时比不考虑延时的ATC增量。

4 算例分析

为了验证本文所述理论的正确性,选取由比利时20节点输气系统以及IEEE 39节点系统(划分为3个子系统)构成的电-气互联能源系统^[18],如附录A中图A1所示。将所有发电机出力上限提高50%,且假定IEEE 39节点系统中节点30、32、34、37所连发电机为燃气轮机,分别与比利时20节点天然气系统

的节点13、7、6、20、12相连。

4.1 天然气网延时对ATC的影响分析

定义情况1为节点3、6、10、18的负荷发生变化,变化情况如附录A中表A1所示。

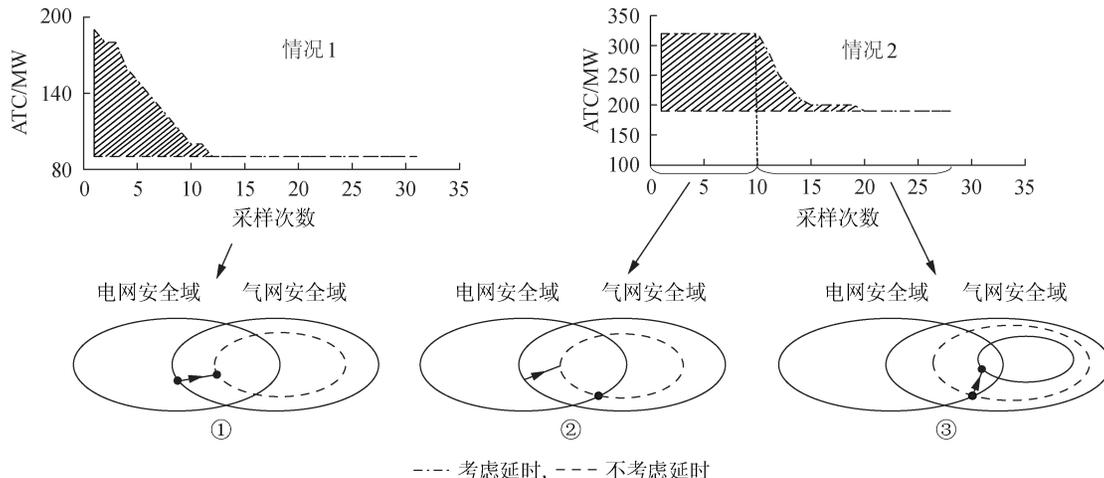
定义情况2为节点8压缩机的变比为1.3,节点17压缩机变比为1.2,节点3、6、10、18的负荷发生变化,变化情况如附录A中表A2所示。

基于ASBM进行求解,时间间隔取5 min(时间间隔的大小取决于天然气网延时的时长,算例中天然气系统延时约为150 min,时间间隔取5 min相对较短,对于考虑天然气网延时的ATC计算以及区域间能量传递能力的影响可以忽略不计)。情况1与情况2下IEEE 39节点系统区域3至区域1的ATC的情况见附录B。

在考虑天然气网延时对电网的ATC影响时,情况1中的电网ATC值主要由天然气网约束,当天然气网的负荷变化时,ATC值会随之发生变化。情况2中的电网ATC值主要由电网约束,天然气网的负荷发生变化时,天然气网距离安全运行的边界还有一定距离,ATC值还是由电网约束,一段时间内电网ATC值不会发生变化,当天然气网负荷变化使天然气网络达到安全运行的边界时,电网的ATC开始主要由天然气网影响,从此时开始,天然气网的负荷继续变化,电网的ATC将会有所减小。2种情况下的ATC如图7所示,图中阴影部分为考虑延时相比于不考虑延时2个区域间多输送的电能。

图7中的情况1是电-气互联系统的初始状态在天然气网的安全域边界,当天然气网的负荷增加时,天然气网的安全域减小,为了保证天然气网的安全,燃气轮机的进气量将会减小,燃气轮机出力减小。因此,ATC值将会减小。

图7中情况2的②是电-气互联的系统初始状态在电力系统的安全域边界,当天然气网的负荷增加



--- 考虑延时, --- 不考虑延时

图7 2种情况下ATC的对比

Fig.7 ATC comparison between two cases

时,虽然天然气网的安全域减小,但此时的运行状态仍然在天然气网的安全域内,ATC值仍然由电力系统约束,不发生变化(如图中情况2的1—10次采样)。

图7中情况2的③与情况1是相同的,此时电-气互联系统的运行状态已经达到天然气网安全运行边界。图中情况2下考虑延时的ATC增量比情况1更加显著。

由图7可见,2种情况下天然气网负荷发生变化时,考虑延时比不考虑延时的ATC有一定程度的增强。

4.2 ASBM 计算 ATC 的高效性

以区域3向区域1输电为例,比较ASBM与传统连续潮流方法计算ATC的速度,采用Intel双核2.2 GHz主频、4 GB内存硬件计算环境,基于MATLAB软件对上述算例进行编程求解得到区域3向区域1的ATC为320 MW。

(1)若采用传统连续潮流的方法,设定步长为10 MW,需要重复计算系统的潮流32次,需耗时2.733 s。

(2)若采用ASBM,设定精度与传统连续潮流法精度相同,需重复计算系统的潮流7次,需耗时0.914 s。

图8为区域3向区域1输电采用ASBM计算ATC的示意图。图中, P_{L27} 为电网中支路27流过的有功功率值; $P_{L\Sigma}$ 为总的负荷增量值。由图8可以看出,每次预测下一个相邻的总负荷增量值时,总是以当前系统状态距离安全域边界的距离为依据,按照一定的比例增加或减少总的负荷增量值。这种计算方法使系统在距离安全域较远的地方总负荷变化量的变化步长较大,而当系统运行状态接近系统安全域边界时步长自动变小。与传统连续潮流求解方法相比,该方法具有自动变步长的特点,在距离安全域边界较远处,步长较长,可以有效提高计算效率;在距离系统安全域较近处,步长自动减小,可以提高计算效率和精度。

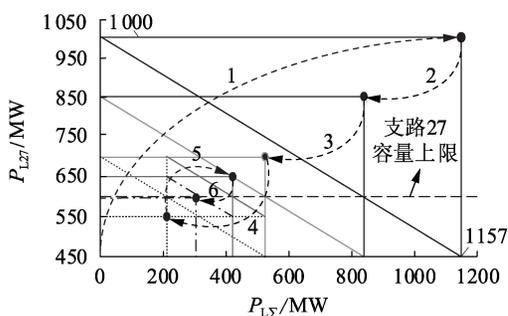


图8 区域3向区域1输电采用ASBM计算ATC
Fig.8 ATC calculation by ASBM when power transmitted from Region 3 to Region 1

5 结论

本文通过对天然气网的延时特性进行建模,从稳态层面研究了天然气网的延时特性对ATC的影

响,并且提出了一种新的计算ATC的方法,该方法采用线性插值的原理预测下一个相邻负荷增量值,当2个负荷增量值之间的区间较小时,负荷增量与系统安全约束之间呈线性关系,该方法可以得到一个准确的负荷增量值。实验结果表明:天然气网的延时特性可以提高系统ATC值,从而提高系统区域间的能量传输能力;采用ASBM计算ATC可以显著提高计算效率。

通过电转气向天然气网的薄弱节点注入天然气,维持天然气节点压力,增大天然气网的安全运行边界,从而提高系统的ATC,是有待于将来深入研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李扬,闫爱梅,田传波. 区域综合能源管控系统设计与实现[J]. 供用电, 2019, 36(3): 8-13.
LI Yang, YAN Aimei, TIAN Chuanbo. Design and implementation of regional integrated energy management and control system [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 8-13.
- [2] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, LI Z, et al. Component and mode models for the short-term scheduling of combined-cycle units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 976-990.
- [3] 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 concepts and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] CHAUDRY M, WU J Z, JENKINS N. A sequential Monte Carlo model of the combined GB gas and electricity network [J]. Energy Policy, 2013, 62: 473-483.
- [8] 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 Zhihong, 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.
- [9] WEI Z, CHEN S, SUN G, et al. Probabilistic available transfer capability calculation considering static security constraints and uncertainties of electricity-gas integrated energy systems [J]. Applied Energy, 2016, 167(5): 305-316.
- [10] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow [C]//Proceedings of 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, Texas, USA: IEEE, 2003: 138-143.
- [11] JIRUTITIJAROEN P, KIM S, KITTITHREERAPRONCHAI O, et al. An optimization model for natural gas supply portfolios of a power generation company [J]. Applied Energy, 2013, 107(5):

- 1-9.
- [12] 张晓英,贾磊,王琨,等. 基于切片反射采样的风电并网系统可用输电能力概率风险评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):25-31.
ZHANG Xiaoying, JIA Lei, WANG Kun, et al. Wind power grid-connected system based on slice reflection sampling can be used to estimate the probability of transmission capacity probability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 25-31.
- [13] 陈厚合,李国庆,张芳晶. 风电并网系统区域间概率可用输电能力计算[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(21):59-65.
CHEN Houhe, LI Guoqing, ZHANG Fangjing. Calculation of probabilistic available transfer capability of wind farm incorporated system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 59-65.
- [14] 韩学山,李晓波. 考虑元件长期载荷容许条件的最大可用输电能力的实用计算方法[J]. 电网技术,2004,28(24):10-15.
HAN Xueshan, LI Xiaobo. Practical calculation method of maximal available transfer capability considering long-term load permissible condition of power transmission components [J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 10-15.
- [15] 潘雄,徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):90-95.
PAN Xiong, XU Guoyu. OPF based ATC calculation with static voltage stability constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 90-95.
- [16] 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(2): 531.
- [17] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN 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] 孙国强,陈胜,郑玉平,等. 计及电-气互联能源系统安全约束的可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):26-32.
SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZHENG Yuping, et al. Available transfer capability calculation considering electricity and nature gas coupled energy system security constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 26-32.

作者简介:



陈厚合(1978—),男,江苏徐州人,教授,博士,从事电力系统安全性与稳定性方面的研究(**E-mail**: chenhouhe@neepu.edu.cn);

尚聪(1997—),男,吉林长春人,硕士研究生,从事考虑天然气系统影响的可用输电能力的计算研究工作(**E-mail**: shangcong2018@aliyun.com);

王丹(1981—),男,安徽安庆人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源系统分析、智能配用电系统分析以及分布式能源与微网(**E-mail**: wangdantjuee@tj.edu.cn);

李思源(1997—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源电力系统分析(**E-mail**: 576210851@qq.com);

姜涛(1983—),男,湖北随州人,教授,博士,研究方向为电力系统安全性和稳定性、可再生能源集成、综合能源系统(**E-mail**: t.jiang@aliyun.com)。

Available transfer capability calculation of integrated electricity and natural-gas systems considering delay characteristics of gas transmission system

CHEN Houhe¹, SHANG Cong¹, WANG Dan², LI Siyuan², JIANG Tao¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The power generation proportion of gas turbine and the scale of natural gas network are increasing in the integrated electricity and natural-gas systems, while the traditional ATC (Available Transfer Capability) calculation method of power system doesn't consider the transmission delay characteristics of natural gas system, so ATC calculation of integrated electricity and natural-gas systems considering the delay characteristics is researched. The equal interval sampling method is adopted to represent the dynamic process of delay, the boundary value of node pressure of natural gas network and intake gas of gas turbine at different sampling points are calculated, and the intake gas of gas turbine is converted into the upper limit of power generation output, and the steady-state ATC values at different time during the change process are calculated. In order to improve the calculation efficiency, ASBM (Adaptive Step Bisection Method) is used to solve the ATC, and the next predicted operation point is determined according to the distance between the operation point and the security domain boundary. Case analysis shows that the delay characteristics of natural gas system can improve the ATC value, and verifies the efficiency of ASBM in solving ATC.

Key words: ATC; energy internet; energy interconnection; delay characteristics of natural gas network; dichotomy; adaptive step

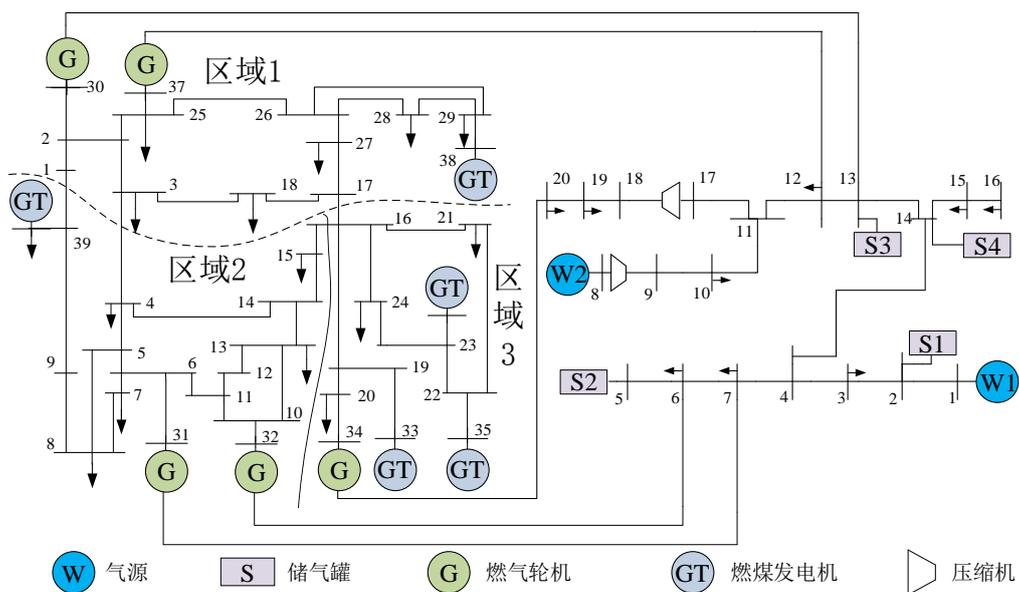


图 A1 电-气互联系统

Fig.A1 Electricity-gas interconnection system

表 A1 情况 1 负荷变化的情况

Table A1 Load change in Case1

节点	负荷/(m ³ ·d ⁻¹)	
	状态 1	状态 2
3	3.918×10 ⁶	5.093 4×10 ⁶
6	7.166 7×10 ⁶	9.316 7×10 ⁶
10	6.356×10 ⁶	7.5×10 ⁶
18	0	0.19×10 ⁶

表 A2 情况 2 负荷变化的情况

Table A2 Load change in Case 2

节点	负荷/(m ³ ·d ⁻¹)	
	状态 1	状态 2
3	3.918×10 ⁶	5.093 4×10 ⁶
6	7.166 7×10 ⁶	9.316 7×10 ⁶
10	6.356×10 ⁶	7.5×10 ⁶
18	0	0.5×10 ⁶

附录 B

表 B1 情况 1 区域 3 至区域 1 的 ATC 的对比

Table B1 Comparison of ATC between Region 3 and Region 1 in Case 1

时间/min	ATC 计算值/MW	
	不考虑延时	考虑延时
5	90	190
10	90	180
15	90	180
20	90	160
25	90	150
30	90	140
35	90	130
40	90	120
45	90	110
50	90	100
55	90	100
60	90	90

表 B2 情况 2 区域 3 至区域 1 的 ATC 的对比

Table B2 Comparison of ATC between Region 3 and Region 1 in Case 2

时间/min	ATC 计算值/MW	
	不考虑延时	考虑延时
5	190	320
10	190	320
15	190	320
20	190	320
25	190	320
30	190	320
35	190	320
40	190	320
45	190	320
50	190	320
55	190	290
60	190	250
65	190	230
70	190	210
75	190	200
80	190	200
85	190	200
90	190	200
95	190	200
100	190	190