# 基于投影积分的气-电耦合园区综合能源系统动态仿真方法

田伟堃,于 浩,李 鹏,冀浩然,王成山 (天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:在充分考虑电力、燃气系统及其相互转化特性的基础上,建立了气-电耦合园区综合能源系统动态仿真 模型,并根据动态过程的时间尺度对刚性系统进行划分;在此基础上,基于投影积分理论,提出一种适用于 气-电耦合园区综合能源系统的高效率动态仿真方法,采用内部积分器以小步长的显式和隐式欧拉法交替求 解来精细刻画快动态过程,采用外部积分器以可变大步长二阶牛顿插值高效求解慢动态过程,且在计算过程 中能够有效计及故障扰动等事件的影响;对算法的数值精度进行分析。基于典型算例的算法测试表明,所提 方法能够有效实现多场景下的气-电耦合系统快速稳定求解,在保证精度的前提下有效提升仿真效率。 关键词:园区综合能源系统;气-电耦合;投影积分;动态仿真;刚性系统

中图分类号:TM 74:TK 01 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008027

## 0 引言

随着能源与环境问题的日益突出,能够实现消 费侧多种能源协调互补与梯级利用的园区综合能源 系统成为研究热点<sup>[1]</sup>。在各类园区综合能源系统组 建方案中,电能清洁高效、可控性强、易于转化利用, 天然气、氢气等燃气能源经济环保、使用便捷,使气-电耦合成为园区综合能源系统中十分常见的能源组 织形式,相关技术问题得到广泛关注。

园区综合能源系统作为靠近用户侧的能源供应 环节,其运行水平直接决定了用户的用能体验。然 而,随着用户侧分布式可再生能源渗透率不断提升, 系统运行所面临的不确定性也愈发突出。特别是在 气-电耦合园区综合能源系统中,除了电网中光伏、 风电等分布式电源会对系统运行造成影响,气网中 也存在由于燃气负荷改变等带来的扰动,整个系统 的不确定性相互耦合并显著增强。动态仿真是刻画 综合能源系统复杂运行特性的重要手段,也是多场 景下系统运行控制、安全分析等上层应用的必要支 撑<sup>[2]</sup>,发展更加准确和高效的园区综合能源系统动 态仿真方法与工具有重要意义,例如:①在进行优化 调度的过程中,考虑设备的动态模型,可提高调度精 度[3];②通过对各种能源出力不确定性影响进行仿 真分析,预测并避免可能发生的越限、过载等问题, 提高供能安全性和可靠性[4];③对于工业园区,通过 能源调度与生产过程的动态协同仿真分析,支撑更 加合理的生产计划和能源利用,有效减少能源消耗, 提高经济效益<sup>[5]</sup>;④对于生活园区,运用动态仿真提 高运行调度的精细度,支撑多种能源形式的充分协

收稿日期:2020-02-22;修回日期:2020-06-17 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51961135101,51907139) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51961135101,51907139) 调与互动,有效提升分布式能源消纳水平,降低用能成本和提高用户用能体验等<sup>[6]</sup>。

气-电耦合园区综合能源系统动态仿真问题具 有以下典型特征:第一,整个系统在特定空间范围内 高度集成,各类能源耦合性强,气-电能源在生产和 消费过程中互动频繁,关联紧密,必须从整体上进行 仿真分析<sup>[7]</sup>;第二,系统动态过程涵盖了较宽的时间 尺度,如电力电子器件的动态过程仅为微秒级,而燃 气管道压强或流量的变化一般会持续几分钟,气、热 负荷变化过程甚至需要以小时为单位加以考虑<sup>[8]</sup>, 仿真中既要刻画快动态,又要兼顾慢动态,求解方法 面临巨大挑战;第三,由于园区系统集成度高、耦合 环节丰富,气-电能源转换装置对系统整体动态特性 的影响显著,需要对微燃机、电转气(P2G)设备等不 同耦合装置的动态特征加以详细考虑,并由此引入 了机械、化学等新的动态过程,使得仿真问题复杂性 进一步提升。

目前,对于气-电耦合综合能源系统的稳态分析 已经取得了一定研究成果<sup>[9]</sup>,但由于其动态仿真问 题在数学本质上属于典型的刚性数学模型求解问 题,快、慢动态巨大的时间尺度差异使算法求解速 度、精度和稳定性难以兼顾。相关动态仿真问题研 究的关注点之一在于实现电力和燃气等能源系统的 联合求解,如文献[10]针对气-电耦合综合能源系 统,采用牛顿-拉夫逊法迭代求解稳态电力系统,采 用隐式欧拉法差分化求解动态燃气系统,以实现联 合求解;文献[11]提出一种基于时变能量网络理论 的综合能源系统动态仿真方法,将不同类型的能源 网络联立为统一的状态方程求解;文献[12]将气网 模型中的偏微分方程转化为代数方程,极大地降低 了分析的难度。研究的另一关注点是考虑系统刚性 特征的求解方法,如文献[13]针对电力系统中的刚 性问题,提出一种隐式的后向离散状态事件驱动算 法;文献[14]针对电力系统动态仿真的多时间尺度 特征,提出一种基于矩阵指数的仿真计算方法,实现 了状态空间框架下的大步长求解;文献[15]根据系 统动态过程的快慢,将系统分组,每组用不同的仿真 步长求解以兼顾仿真速度和精度;文献[16]首次提 出投影积分思想,通过对快、慢动态过程积分器进行 区别化设计,提高仿真计算效率与稳定性,这一思路 已在有源配电网仿真等问题中得到了有效应用<sup>[17]</sup>。

与其他求解方法相比,投影积分算法可根据实际系统特征和仿真需要,选取不同的内部积分器和 外部积分器算法格式,从而能够兼具不同积分算法 在速度、精度和稳定性方面的优势,最终实现求解性 能和适用范围的提升。本文基于投影积分思想,提 出了一种面向气-电耦合园区综合能源系统的高性 能动态仿真方法,在充分考虑电力、燃气系统及耦合 环节的物理结构与模型数学特征的基础上,通过对 投影积分整体架构与内、外部数值积分器的合理设 计实现了在多场景下的快速、稳定求解,并通过典型 算例验证了算法的有效性。

## 1 气-电耦合园区综合能源系统动态模型

气-电耦合园区综合能源系统动态模型由电力 系统和燃气系统两部分构成,整体系统模型可以写 为由偏微分-微分-代数方程构成的一般形式:

$$\frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial t} = \boldsymbol{F}\left(\frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial \boldsymbol{l}}, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}\right), \quad \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{G}\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}\right), \quad \boldsymbol{0} = \boldsymbol{\varphi}\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}\right) \quad (1)$$

其中,F为偏微分环节,C为微分环节, $\varphi$ 为代数方程,偏微分和微分环节用于描述系统的动态变化过程,代数方程用于描述系统的伏安特性和各物理量的守恒; $x \in \mathbb{R}^{n_x}$ 为系统状态变量, $y \in \mathbb{R}^{n_y}$ 为系统代数变量, $l \in \mathbb{R}^{n_y}$ 为系统状态变量, $n_x, n_y, n_l$ 分别为系统状态变量、代数变量和空间长度变量的个数。为便于分析,根据动态过程时间的长短,上述一般模型可以进一步表达为式(2)所示的电力系统环节和式(3)所示的燃气系统环节两部分。

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{e} = \boldsymbol{G}_{1} \left( \boldsymbol{x}_{e}, \boldsymbol{y}_{e}, \boldsymbol{x}_{g}, \boldsymbol{y}_{g} \right), \quad 0 = \boldsymbol{\varphi}_{1} \left( \boldsymbol{x}_{e}, \boldsymbol{y}_{e}, \boldsymbol{x}_{g}, \boldsymbol{y}_{g} \right)$$
(2)

$$\frac{\partial \boldsymbol{x}_{g}}{\partial t} = \boldsymbol{F}_{1} \left( \frac{\partial \boldsymbol{x}_{g}}{\partial \boldsymbol{l}}, \, \boldsymbol{x}_{g}, \, \boldsymbol{y}_{g}, \, \boldsymbol{x}_{e}, \, \boldsymbol{y}_{e} \right), \quad 0 = \boldsymbol{\varphi}_{2} \left( \boldsymbol{x}_{g}, \, \boldsymbol{y}_{g}, \, \boldsymbol{x}_{e}, \, \boldsymbol{y}_{e} \right) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{x}_{e} \in \mathbf{R}^{n_{s_{e}}}$ 为电力系统状态变量,由电机转速、功 角等组成, $\mathbf{x}_{g} \in \mathbf{R}^{n_{s_{e}}}$ 为燃气系统状态变量,由节点压 强、管道流量等组成, $\mathbf{y}_{e} \in \mathbf{R}^{n_{y_{e}}}$ 为电力系统代数变量, 由节点电压、功率等组成, $\mathbf{y}_{g} \in \mathbf{R}^{n_{y_{e}}}$ 为燃气系统代数变 量, $n_{x_{e}}, n_{x_{e}}, n_{y_{e}}$ 分别为电力系统状态变量、燃气系 统状态变量、电力系统代数变量和燃气系统代数 变量的个数; $\mathbf{G}_{1}$ 为电力系统中的微分环节,主要用于 描述电力系统中的机电动态过程; $\mathbf{F}_{1}$ 为燃气系统中 的偏微分环节,主要用于描述燃气在管网中的传 输过程; $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 分别为电力系统和燃气系统的代数方程,分别由电力网络伏安特性、燃气节点流量 守恒等代数约束构成。整个系统的状态变量 $x = [x_e; x_g]$ ,代数变量 $y = [y_e; y_g]$ 。

由于具体系统构成和气-电耦合方式的不同,上 述一般性模型可能具有不同的表达形式。本文建立 最具代表性的气-电-微燃机-P2G双向耦合的气-电 耦合园区综合能源系统,并对燃气系统环节和电力 系统环节的模型构成进行具体介绍。

## 1.1 燃气系统环节模型

燃气的传输过程属于气-电耦合园区综合能源 系统中典型的慢动态过程,一般可将其视为一维可 压缩流体进行建模,如图1所示<sup>[15]</sup>。图中,*A*为管道 截面积;*p*为管道节点压强;*M*为管道的质量流量;*θ* 为管道与水平方向的夹角;*g*为重力加速度;*l*为管道 的空间长度。考虑到气-电耦合园区综合能源系统 的实际特点,一般可以做以下假设:沿气流方向管道 的横截面积不变;与管道直径相比,管道的曲率半径 很大;气体温度和管道内声速不变;管道为水平放 置,不考虑管道高度差的影响。由此可得燃气传输 管网实用数学模型如下<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{A}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial l} = 0\\ \frac{\partial p}{\partial l} + \frac{1}{A} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\lambda c^2 M |M|}{2DA^2 p} = 0 \end{cases}$$
(4)

其中,D为管道的直径;c为管道内的声速;λ为摩擦 系数。



图 1 一维可压缩流体通用模型 Fig.1 General model of one-dimensional compressible fluid

将式(4)按各燃气管网拓扑关系进行组合可构成燃气管网部分模型,即式(3)中的偏微分方程部分,式(4)中各管道的压强p、流量M即构成式(3)中燃气系统状态变量 $\mathbf{x}_{go}$ 

## 1.2 电力网络模型

电力网络中,考虑到电的传输过程时间尺度远 小于气体动态过程,因此可忽略电磁快动态过程。 对于以电动机为代表的含机械动态负荷,其模型和 接口方式与微燃机机组的电机模型相似,其模型将 在1.3节介绍。采用阻抗模型对线路及恒阻抗负荷进行建模<sup>[15]</sup>,各动态负荷以电流形式注入,利用节点法对电力网络进行求解,即:

$$I = YU \tag{5}$$

其中,*I*为节点注入电流向量;*Y*为节点导纳矩阵;*U* 为节点电压向量。

## 1.3 气-电耦合环节及接口模型

按能量转换关系不同,气-电耦合环节可分为2 类:P2G环节,如P2G装置等;气转电环节,如微燃 机等。

一种典型的分轴微燃机原动环节模型如附录图 A1所示。其采用恒功率控制方式,输出功率偏差经 过比例积分控制,再与最大负荷温度控制经过低值 门,产生燃料供应量信号;燃料经过阀门调节后经燃 烧环节所产生的功率,减去转子运动阻尼损耗,得到 微燃机输出的机械功率<sup>[18]</sup>。

分轴微燃机系统通过同步发电机可以得到注入 电网的电流,进而求解电网模型<sup>[19]</sup>,考虑到气-电环 节时间尺度差异,一般可忽略电机内部的电磁动态, 只考虑其机械动态过程,如采用同步电机二阶模型:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\delta}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{N}}(\boldsymbol{\omega}_{*} - 1) \\ T_{\mathrm{J}} \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_{*}}{\mathrm{d}t} = P_{\mathrm{m}} - P_{\mathrm{e}} - K_{\mathrm{D}}(\boldsymbol{\omega}_{*} - 1) \end{cases}$$
(6)

其中, $\delta$ 为同步电机的功角; $\omega_*$ 为电机转速; $\omega_N$ 为电 机额定转速; $P_m$ 为原动机输出机械功率; $P_e$ 为电磁 功率; $K_p$ 为同步机阻尼系数; $T_1$ 为惯性时间常数。

上述微燃机系统构成了一种气-电系统的耦合 方式。综合燃料供应环节<sup>[15]</sup>、附录图A1所示原动环 节以及电机环节模型(式(6))可推导得接口方程,并 可进一步写为耦合环节模型的一般形式:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_{\text{state}} = f\left(\boldsymbol{x}_{\text{state}}, \boldsymbol{u}\right) \\ 0 = \boldsymbol{\psi}\left(\boldsymbol{x}_{\text{state}}, \boldsymbol{y}\right) \end{cases}$$
(7)

其中,x<sub>state</sub>为耦合环节状态变量;f为微分方程函数 项;ψ为输出方程函数项;输入量u和输出量y分别 为耦合环节的输入项和输出项,涵盖了与电网和气 网的接口量。以微燃机系统为例,其电网侧耦合接 口量一般为接入电网的节点电压和电磁功率;在气 网侧的耦合接口量一般为接口处的压强和注入微燃 机的气体流量。由此,借助式(7),即可将电力网络 模型(式(5))和燃气网络模型(式(4))进行联立。

对于 P2G 设备构成的耦合接口模型可以采用与 上述类似的方式推导。为简化,本文将 P2G 设备视 为电网的负荷,忽略其动态过程,根据 P2G 消耗的电 功率按恒定系数转换为产生的燃气流量:

$$M_{\rm p2g} = P_{\rm p2g} \frac{\mu}{H} \tag{8}$$

其中, M<sub>p2g</sub>为 P2G 装置产生的气体流量; P<sub>p2g</sub>为 P2G 装置需要的电功率, 可由相应电压和阻抗求得; μ为转换效率; H为燃气燃烧的热值。P2G 环节的耦合接口方式仍符合式(7)所示的一般形式, 不再赘述。

对于微燃机、P2C等气-电耦合环节可视为等效 的电网源或荷<sup>[20]</sup>,考虑到电磁与机械过程的时间尺 度差异,对这些耦合环节的建模一般可忽略其内部 的电磁快动态,而只计及机械、气压等时间常数较大 的动态过程,其动态过程尺度与电力网络中的机电 动态过程尺度类似。因此,为便于求解,其模型也可 纳入电力系统部分中,即本文将气-电耦合环节和电 力网络两部分都纳入式(2)进行求解。

## 2 基于投影积分的动态仿真方法

## 2.1 算法流程

投影积分算法的基本思想为:首先,使用内部积 分器对整个系统进行若干次小步长积分,积分次数 与快动态过程的时间尺度相对应,以精细刻画快动 态过程;然后,进行一次大步长的外部积分器运算, 求解步长与慢动态过程的时间常数相对应,从而在 保证快动态求解精度的同时提高仿真计算速度<sup>[16]</sup>, 投影积分算法的原理图如图2所示<sup>[17]</sup>。



## 图 2 投影积分算法示意图 Fig.2 Schematic diagram of projective integration algorithm

本文将投影积分算法与气-电耦合园区综合能 源系统模型特征相结合,实现了基于投影积分的气-电耦合系统的动态仿真。

对于动态仿真而言,必须通过合理的算法设计 来有效处理仿真中的各种扰动事件。本文所提投影 积分算法中,在扰动发生后,系统运行状态变化比较 剧烈,需要采用较小的计算步长以保证计算的精度。 具体而言,当扰动发生在投影积分算法内部积分器 中间某一步时,为保证精细刻画整个系统的快动态 过程,需初始化当前时刻内部积分器循环次数*i*=1, 并重新开始内部积分器的运算;在进行外部积分器 运算前,先预判在外部积分器计算过程中是否会有 扰动发生,若没有则进行外部积分器运算,否则转换 为使用内部积分器计算<sup>[17]</sup>。据此,根据输入的内部 积分器积分步数*k*、外部积分器步数*M*。以及其余各 元件参数初值,投影积分算法一个步长的计算步骤 如下:(1)设定当前内部积分器循环次数*i*=1,外推 步数 $M_t = M_0$ ;(2)令仿真时间 $t = t + \Delta t$ ,内部积分器进 行一次运算,得到第i次求解后整个系统在该时刻 的状态变量x和代数变量 $\gamma$ ,并令内部积分器循环 次数i=i+1;(3)判断 $t+\Delta t$ 时刻是否有扰动发生,若 有则根据扰动信息修改电网和气网的拓扑结构和动 态参数,并将内部积分器循环次数;重新置为1,否 则进入下一步骤:(4)判断内部积分器循环次数i是 否小于或等于k,若是则返回步骤(2),否则进入下一 步骤;(5)判断 $t \sim (t + M_{\Delta}t)$ 时段内是否有扰动发生, 若扰动发生时刻 $t_h$ 满足 $t < t_h < t + M_t \Delta t$ ,则返回步骤 (1),否则转至下一步骤;(6)令仿真时间 $t=t+M_t\Delta t$ , 外部积分器进行一次运算,得到 $t+M_{\Delta t}$ 时刻系统的 状态变量 $x_{k+M}$ 和系统的代数变量 $y_{k+M}$ ;(7)判断仿 真时间t是否小于仿真终止时刻T.若是则返回步骤 (1),否则转至下一步骤;(8)输出仿真结果,仿真任 务结束。

综上,基于投影积分的气-电耦合园区综合能源 系统动态仿真算法流程如附录图A2所示。

## 2.2 内部积分器

采用内部积分器求解的主要目的是准确刻画系 统的快动态过程,采用的步长较小,精度较高。本文 考虑到电力系统和燃气系统在时间尺度上的巨大差 异,在内部积分器中采用了气-电系统模型交替求解 的方式。对式(2)所示的电力系统环节采用前向欧 拉法以提高求解的速度;对式(3)所示的燃气系统环 节则采用后向欧拉法求解,以避免对偏微分方程进 行空间差分后带来的积累误差。

以下为内部积分器的具体求解步骤。

(1)对电力系统环节进行求解。

采用前向欧拉法将式(2)中的微分方程差分化, 对电力系统环节求解一次,模型中燃气系统环节的 状态变量 $\mathbf{x}_{g}$ 和代数变量 $\mathbf{y}_{g}$ 采用上一时刻的历史量, 设步长为 $\Delta t$ ,时间为 $t \sim t + \Delta t$ ,计算得到 $\mathbf{x}_{g}(t + \Delta t)$ 为:

 $\begin{aligned} \boldsymbol{x}_{e}(t+\Delta t) &= \boldsymbol{x}_{e}(t) + \boldsymbol{G}_{1}(\boldsymbol{x}_{e}(t), \boldsymbol{y}_{e}(t), \boldsymbol{x}_{g}(t), \boldsymbol{y}_{g}(t)) \Delta t \ (9) \\ & \text{求解式}(2) 中的代数方程, 得到 \boldsymbol{y}_{e}(t+\Delta t) 满足: \end{aligned}$ 

 $0 = \boldsymbol{\varphi}_1 \left( \boldsymbol{x}_e(t + \Delta t), \boldsymbol{y}_e(t + \Delta t), \boldsymbol{x}_g(t), \boldsymbol{y}_g(t) \right) \quad (10)$ (2) 对燃气系统环节进行求解。

采用后向欧拉法对式(3)中的偏微分方程在时间和空间上进行差分化,设时间步长为 $\Delta t$ ,空间步长为 $\Delta l$ ,时间为 $t \sim t + \Delta t$ ,电力系统环节变量采用上一步中求得的电力系统在 $t + \Delta t$ 时刻值 $\mathbf{x}_e(t + \Delta t)$ 和 $\mathbf{y}_e(t + \Delta t)$ ,形成的燃气系统环节递推公式如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{g1}(t+\Delta t) = \boldsymbol{x}_{g1}(t) + \boldsymbol{F}_{g}\Delta t \\ 0 = \boldsymbol{\varphi}_{2}(\boldsymbol{x}_{g1}(t+\Delta t), \boldsymbol{y}_{g}(t+\Delta t), \boldsymbol{x}_{e}(t+\Delta t), \boldsymbol{y}_{e}(t+\Delta t)) \end{cases}$$
(11)

其中,**x**<sub>g1</sub>为偏微分方程在空间上进行差分化维数增加后形成的新燃气系统环节状态变量矩阵;**F**<sub>g</sub>为偏微分方程差分后的形式,如式(12)所示。

$$\boldsymbol{F}_{g} = \boldsymbol{F}\left(\frac{\boldsymbol{x}_{g1}(t+\Delta t, l+\Delta l) - \boldsymbol{x}_{g1}(t+\Delta t, l)}{\Delta l}, \, \boldsymbol{x}_{g1}(t+\Delta t), \\ \boldsymbol{y}_{g}(t+\Delta t), \, \boldsymbol{x}_{e}(t+\Delta t), \, \boldsymbol{y}_{e}(t+\Delta t)\right)$$
(12)

差分后的偏微分-微分-代数方程可以进一步 整理为线性方程组形式<sup>[21]</sup>:

$$\boldsymbol{A}_{x} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{g1}(t + \Delta t) \\ \boldsymbol{y}_{g}(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \boldsymbol{b}$$
(13)

其中, $A_x$ 为系数矩阵;b为常数向量。求解式(13)即 可得差分化后燃气系统环节各状态变量 $x_{g1}(t+\Delta t)$ 和代数变量 $y_g(t+\Delta t)$ 。

## 2.3 外部积分器

外部积分器根据内部积分器的求解结果和趋势 计算一个大步长后整个系统的状态。由于采用大步 长对系统进行求解,可显著提高计算效率。外部积 分器可选择适合大步长下稳定求解的数值积分或外 推算法,本文采用二阶牛顿插值公式进行外推。

以下为外部积分器的具体运算步骤。

(1)外推运算。 牛顿插值公式如下<sup>[22]</sup>:  $f(x)=f(x_0)+f[x_0,x_1](x-x_0)+$  $f[x_0,x_1,x_2](x-x_0)(x-x_1)+\dots+$  $f[x_0,x_1,\dots,x_n](x-x_0)\cdots(x-x_{n-1})$  (14)

根据进行外部积分运算前最后 3 次投影积分 内部积分器求解的系统状态变量,即第k-2次、第 k-1次和第k次求解得到的整个系统状态变量 $x_{k-2}$ 、  $x_{k-1}$ 和 $x_k$ ,利用式(14)外推一个大步长,即可得到t+ $M,\Delta t$ 时刻的系统状态变量 $x_{k+N}$ :

$$\boldsymbol{x}_{k+M_{t}} = \left(\frac{1}{2}M_{t}^{2} + \frac{3}{2}M_{t} + 1\right)\boldsymbol{x}_{k} - \left(M_{t}^{2} + 2M_{t}\right)\boldsymbol{x}_{k-1} + \left(\frac{1}{2}M_{t}^{2} + \frac{1}{2}M_{t}\right)\boldsymbol{x}_{k-2}$$
(15)

根据求解得到的状态变量**x**<sub>k+M<sub>i</sub></sub>,求解代数方程

 $\varphi(\mathbf{x}_{k+M_{i}}, \mathbf{y}_{k+M_{i}})=0$ ,得到系统的代数变量 $\mathbf{y}_{k+M_{i}}$ 。

(2)变化率控制。

在外推计算后进行状态变量变化率分析,将结 果与设定的阈值进行比较,动态调整外推步长,防止 外推步长较大造成数值失稳。

具体而言,在每次外推运算后,需判断外推得到的*x<sub>k+M</sub>*是否满足如下数值变化率约束条件:

$$\max \left| \boldsymbol{x}_{k+M_{l}} - \boldsymbol{x}_{k} \right| < \boldsymbol{\xi} \tag{16}$$

44

其中,ξ为预先设定的阈值。

若满足式(16),则可进入下一步骤;否则需缩短 外部积分器步长,即令*M*<sub>i</sub>=*M*<sub>i</sub>-1,重新进行外推计 算,直至满足变化率控制条件为止。

## 2.4 数值精度分析

本节从理论角度对本文提出的投影积分算法的数值精度进行分析。对于外推得到的状态变量 x<sub>k+w</sub>,在该周期的起始时刻t<sub>0</sub>进行泰勒展开,有:

$$\boldsymbol{x}_{k+M_{t}} = \boldsymbol{x}(t_{0}) + (k+M_{t})\Delta t \, \boldsymbol{x}'(t_{0}) + \frac{\left[\left(k+M_{t}\right)\Delta t\right]^{2}}{2!} \boldsymbol{x}''(t_{0}) + \dots + \frac{\left[\left(k+M_{t}\right)\Delta t\right]^{m}}{m!} \boldsymbol{x}^{(m)}(t_{0}) + \dots$$
(17)

对于内部积分器求解得到的 $t_0 + k\Delta t$ 时刻的状态变量 $\mathbf{x}_{t_1}$ ,在 $t_0$ 时刻进行泰勒展开可得:

$$\boldsymbol{x}_{k} = \boldsymbol{x}(t_{0}) + k\Delta t \, \boldsymbol{x}'(t_{0}) + O(\Delta t^{2})$$
(18)

其中, $O(\Delta t^2)$ 为 $\mathbf{x}_k$ 的截断误差。

由外部积分器外推得到的状态变量 $\mathbf{x}_{k+M_{t}}$ ,在 $t_{0}$ + $k\Delta t$ 时刻进行泰勒展开:

$$\boldsymbol{x}_{k+M_{i}} = \boldsymbol{x}_{k} + M_{i}\Delta t \, \boldsymbol{x}_{k}' + \frac{\left(M_{i}\Delta t\right)^{2}}{2!} \, \boldsymbol{x}_{k}'' + O\left(\Delta t^{3}\right) \quad (19)$$

其中, $O(\Delta t^3)$ 为 $\mathbf{x}_{k+M}$ 的截断误差。

将式(18)代入式(19),并与式(17)相减得局部 误差为:

$$\frac{k^2}{2}\Delta t^2 \boldsymbol{x}''(t_0) + O\left(\Delta t^3\right) = O\left(\Delta t^2\right)$$
(20)

由此可以看出,本文提出的算法整体精度为一 阶精度,其内部积分器的精度与欧拉法的精度相同 为一阶,外部积分器的精度与牛顿插值的精度相同 为二阶。

## 3 算例分析

本文在MATLAB环境下实现了基于投影积分的气-电耦合园区综合能源系统动态仿真。算例中考虑了电力网络、燃气系统、微燃机、P2G等典型环节,整个系统结构如图3所示。由于电网中以电动机为代表的动态负荷的动态过程与微燃机机组中的电机特性相似,因此在算例中不再设置该类负荷,统一采用阻抗模型对电力网络线路及负荷进行建模。算例中,燃气管网参数见附录表A1,电网线路阻抗和导纳参数可参照文献[23],微燃机采用本文第1节所述方式建模,额定功率为120kW,具体参数可参考文献[18]。仿真测试的硬件平台为Intel Core (TM)i7-8550U CPU@1.80 GHz,8 GB RAM的4核PC机;软件环境为64位Windows 10操作系统。



#### 图3 算例拓扑示意图



## 3.1 场景设置

本文算例中,设置仿真时间T = 1000 s,基于电 力系统和燃气系统的典型时间尺度选取仿真步长  $\Delta t = 0.001$  s, $\Delta l = 25$  m,内部积分器步数k = 100,外 部积分器步数 $M_0 = 50$ ,即外部积分器初始步长为 0.05 s,变化率控制阈值 $\xi = 0.01$ ,设定燃气源为恒定 的气压源。欧拉法因简单、快速、稳定性好且在较 小的步长下有较高的精度,因此本文将同样为一阶 精度的小步长欧拉法求解结果作为依据,对本文提 出的投影积分算法进行验证。基于上述设置,本文 主要考虑以下3种场景:场景1,600 s时电网中节点 23发生非金属接地故障,1 s后故障清除;场景2, 600 s时燃气系统节点5发生故障切负荷,燃气负荷 从18 kg/h降至9 kg/h,100 s后恢复正常;场景3,考 虑新能源出力的不确定性,电网节点22接入分布式 风机,研究其出力波动带来的影响。

#### 3.2 场景1

600 s时,节点23 发生非金属接地故障,分别采 用投影积分算法和小步长欧拉法分别对场景1进行 求解,并将结果进行对比,气-电耦合园区综合能源 系统中气网节点4压强、微燃机机组转速(标幺值, 后同)和注入电网电磁功率(标幺值,后同)的变化情 况分别如图4(a)—(c)所示。

节点23发生非金属接地故障后,节点电压下降,燃气轮机输出功率减少,由于燃气轮机采用恒功率控制,通过微燃机控制系统的调节可以很快到达稳定状态。在这个动态过程中,气网节点4压强降低,流向微燃机的流量升高,微燃机电磁功率逐渐上升。在微燃机控制环节作用下,系统经过一段快动态过程后重新恢复到设定值。故障清除后,系统经过一段暂态过程恢复到正常水平。

## 3.3 场景2

600s时,气网节点5燃气负荷减少,采用投影积 分算法和小步长欧拉法对场景2进行求解对比,系 统中气网节点3和4压强、微燃机机组转速以及注入





电网电磁功率的变化情况分别见图5(a)--(c)。







燃气负荷需求量突然减少时,流入微燃机的燃 气流量逐渐增加,微燃机转速增加,注入电网的功率 增大。此后,由于采用微燃机功率进气量控制,气网 节点3、4的压强依次升高,微燃机输出功率、转速经 过一个动态变化过程后迅速恢复为设定值。700 s 时故障清除后,系统经过一段暂态过程恢复到正常 水平。

## 3.4 场景3

考虑新能源发电技术时,其出力随时间和环境 情况变化而波动,本场景考虑5种风速曲线来模拟 风机出力随机性,如附录图A3所示。采用投影积分 算法进行求解,并将得到的结果与小步长欧拉法进 行对比,验证计及新能源出力具有随机性时算法的 正确性,系统的动态过程如附录图A4所示。

当风机出力波动时,由于微燃机和P2G装置的 耦合,电网和气网都受到一定扰动,但仍然可以保持 稳定。由附录图A4可以看出,本文方法很好地体现 出了分布式电源随机性的影响,具有较高的精度。

#### 3.5 仿真效率分析

通过场景1-3的仿真分析结果可以看出,当电 网发生故障时,系统动态过程持续时间短,变化剧 烈。由于内部积分器的积分步数和外部积分器的数 值变化速率的双重限制,当系统状态变化幅度较大 时,算法运行在内部积分器中或步长缩减的外部积 分器中,保证了快动态过程中的计算精度。当气网 发生故障时,系统动态过程持续时间长,动态过程变 化速率慢,因此,通过外部积分器的大步长外推运算 可以有效提升求解速度,同时不会带来过大的精度 损失。同时,在考虑新能源出力的不确定性时,本文 提出的方法也能满足计算的要求。

针对以上3种场景,利用本文提出的投影积分 算法和小步长欧拉法的求解时间如表1所示,其中 场景3的求解时间为5种出力曲线下仿真的平均时 间。可以看出,在以上3种场景中,由于仿真参数设 置完全相同,因此仿真时间相差不大;与小步长欧拉 法相比,采用投影积分算法时求解速度提高了30% 左右。

#### 表1 3种场景下求解时间比较

Table 1 Comparison of simulation time among

three scenarios

场景	求解时间/s		
	投影积分算法	小步长欧拉法	
1	585.14	850.78	
2	590.63	848.34	
3	582.61	848.09	

#### 3.6 算法特性分析

本文提出的投影积分算法中包含内部积分器积 分步数k、外部积分器积分步数M。以及仿真空间步 长 Δ*l*等多个重要参数。本节针对相同场景利用投 影积分算法进行仿真分析,探究不同参数对算法计 算速率和误差的影响。

针对电网设置一个扰动,即将节点25的功率从 70 kW降至10 kW,使用本文提出的投影积分算法、 小步长欧拉法进行求解,探究内部积分器积分步数*k* 和外部积分器积分步数*M*。对算法的影响,求解时间 如附录表A2所示。可以看出,与小步长欧拉法相 比,采用投影积分算法可显著提高计算效率,并且在 一般情况下,当*M*。不变时,求解速度随着*k*的减小而 提高,当*k*不变时,*M*。越大,求解速度越快。

附录图 A5 以注入电网的功率相对误差为例,选 取附录表 A2 中不同 k、M<sub>0</sub>得到的结果与小步长欧拉 法求解结果对比进行误差分析。可见,当k=100时, 随着 M<sub>0</sub>由 25 增加到 50,外部积分器运算步长增加, 求解相对误差也会增大;当 M<sub>0</sub>=50时,随着 k从 50 增 加到 100,内部积分器的小步长求解步数增加,求解 误差减小。

针对上述电网发生扰动的场景,在内部积分器 步数k=100、外部积分器步数 $M_0$ =50的情况下,设置 不同的 $\Delta t$ 、 $\Delta l$ ,使用投影积分算法和小步长欧拉法进 行对比,探究时间步长 $\Delta t$ 和空间步长 $\Delta l$ 对算法的影 响,求解时间以及电磁功率相对误差的最大值如附 录表A3所示。可以看出,针对同样的模型,一般情 况下,当仿真步长 $\Delta l$ 、 $\Delta t$ 越小时,求解的时间越长; 在一定范围内,随着 $\Delta l$ 的减小,求解的相对误差也 会减小;随着 $\Delta t$ 的增加,求解的相对误差会增大。 需要指出的是,由于仿真步长与求解速度、精度与稳 定性密切相关,需要根据具体仿真需求进行合理设 计,相关方法还需要进一步研究。

### 4 结论

本文提出了一种基于投影积分的气-电耦合园 区综合能源系统的动态仿真方法,该算法的内部积 分器针对电力系统环节和燃气系统环节分别采用了 前向和后向欧拉法,外部积分器采用牛顿插值外推 的形式,同时进行变化率控制,其在加快了系统求解 速度的同时保证了计算的精度。算例分析结果表 明,本文提出的投影积分算法可以有效减少气-电耦 合园区综合能源系统的仿真计算时间,提高仿真计 算效率,且仿真精度可满足多场景下的气、电系统及 耦合环节分析需求。未来相关研究可考虑在数值算 法选取和稳定性分析、仿真步长和关键参数优化等 方面进一步深化,从而能够更有效、准确地满足不同 仿真场景下的计算需求。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究

[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.

JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7):198-207.

- [2] 李亚楼,李芳,刘赫川,等. 基于 PSASP 的综合能源仿真分析系统[J]. 电网技术,2019,43(7):2498-2505.
   LI Yalou, LI Fang, LIU Hechuan, et al. Framework design of simulation system for integrated energy systems based on PSASP[J]. Power System Technology,2019,43(7):2498-2505.
- [3] 顾伟,陆帅,姚帅,等.综合能源系统混合时间尺度运行优化
   [J].电力自动化设备,2019,39(8):203-213.
   GU Wei,LU Shuai,YAO Shuai, et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):203-213.
- [4] ANTENUCCI A, SANSAVINI G. Adequacy and security analysis of interdependent electric and gas networks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2018, 232 (2):121-139.
- [5]张伊宁,何字斌,晏鸣宇,等. 计及需求响应与动态气潮流的 电-气综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42 (20):1-10.
   ZHANG Yining, HE Yubin, YAN Mingyu, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-natural gas system considering demand response and dynamic natural gas flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(20):1-10.
- [6] 孟宪君,穆云飞,王明军,等. 基于热循环蓄热特性的电-热综合能源系统风电消纳策略[J]. 全球能源互联网,2019,2(4): 318-324.
  MENG Xianjun, MU Yunfei, WANG Mingjun, et al. Wind power consumption strategy for electric heating integrated energy system based on thermal storage characteristics of heat cycle
  [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 318-324.
- [7] 黄子硕,何桂雄,闫华光,等.园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J].电力自动化设备,2020,40(1):10-18.
   HUANG Zishuo,HE Guixiong,YAN Huaguang, et al. Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(1):10-18.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] 陈皓勇,陈思敏,黄龙,等.基于时变能量网路理论的综合能源系统动态仿真研究[J].供用电,2018,35(11):20-26.
   CHEN Haoyong, CHEN Simin, HUANG Long, et al. Dynamic simulation of integrated energy system based on time-varying

energy network theory [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35 (11);20-26.

- [12] 陈彬彬,孙宏斌,陈瑜玮,等.综合能源分析的统一能路理论 (一):气路[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):436-443.
  CHEN Binbin,SUN Hongbin,CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(I):gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(2):436-443.
- [13] 李帛洋,赵争鸣,檀添,等.后向离散状态事件驱动电力电子仿 真方法[J].电工技术学报,2017,32(12):42-49.
  LI Boyang,ZHAO Zhengming,TAN Tian, et al. A backword discrete state event driven simulation method for power electronic based on finite state machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(12):42-49.
- [14] VAN NESS J E, KERN F B. Use of the exponential of the system matrix to solve the transient stability problem[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89 (1):83-88.
- [15] XU Xiandong, JIA Hongjie, CHIANG H, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3):1212-1221.
- [16] GEAR C, KEVREKIDIS I. Projective methods for stiff differential equations: problems with gaps in their eigenvalue spectrum[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2003, 24(4): 1091-1106.
- [17] WANG Chengshan, YUAN Kai, LI Peng, et al. A projective integration method for transient stability assessment of power systems with a high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(1):386-395.
- [18] EL-SHARKH M, SISWORAHARDJO N, UZUNOGLU M, et al. Dynamic behavior of PEM fuel cell and microturbine power plants[J]. Journal of Power Sources, 2007, 164:315-321.
- [19] 李鹏. 分布式发电微网系统暂态仿真方法研究[D]. 天津:天 津大学,2010.

LI Peng. Research on the transient simulation methodology of micro-grid powered by distributed energy resources[D]. Tian-jin:Tianjin University, 2010.

- [20] 杨自娟,高赐威,赵明. 电力-天然气网络耦合系统研究综述
   [J]. 电力系统自动化,2018,42(16):21-31,56.
   YANG Zijuan,GAO Ciwei,ZHAO Ming. Summary of research on power-natural gas network coupling system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(16):21-31,56.
- [21] FU Xiaopeng, LI Peng, WANG Chengshan, et al. Extended MANA formulation for time-domain simulations of combined power and gas networks[J]. Energy Procedia, 2019, 158:6576-6581.
- [22] 张平文,李铁军.数值分析[M].北京:北京大学出版社,2007: 30-34.
- [23] 王博,肖峻,周济,等.主动配电网中分布式电源和微网的运行 域[J]. 电网技术,2017,41(2):363-372.
  WANG Bo,XIAO Jun,ZHOU Ji, et al. Dispatchable region of distributed generators and microgrids in distribution systems
  [J]. Power System Technology,2017,41(2):363-372.

## 作者简介:



田伟堃

田伟堃(1997—), 男, 山西兴县人, 硕 士研究生, 研究方向为综合能源系统的仿真 与运行(**E-mail**:tianwk@tju.edu.cn);

于 浩(1988—), 男, 河北沧州人, 讲 师,博士, 通信作者, 研究方向为智能电网与 智能配电网运行、仿真与优化(E-mail: tjuyu@ tju.edu.cn);

李 鹏(1981—),男,天津人,副教授, 博士,研究方向为电力系统仿真与分布式发

电技术(E-mail:lip@tju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

## Projective integration-based dynamic simulation method for community integrated energy system with gas-electricity coupling TIAN Weikun, YU Hao, LI Peng, JI Haoran, WANG Chengshan

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

Abstract: Considering the operating characteristics of power system, natural gas system and their coupling units, a dynamic model of the community integrated energy system with gas-electricity coupling is developed, in which the whole system is divided according to the time scale of their respective dynamics. Based on this model, an efficient dynamic simulation method based on projective integration is proposed, which is suitable for the simulation analysis of the community integrated energy system with gas-electricity coupling. Considering different structural characteristics of the natural gas system and power system, the internal integrator describes the fast dynamic processes finely by alternating the explicit and implicit Euler method of small steps, while the external integrator utilizes a variable large step second-order Newton method to solve the slow dynamic processes effectively. At the same time, the emergencies such as faults or disturbances are addressed effectively while ensuring accuracy. Then, the numerical accuracy of the proposed algorithm is analyzed. Simulative results based on typical examples indicate that the proposed method effectively solves the integrated energy system with gas-electricity coupling in multiple scenarios and improves the simulation efficiency with satisfactory accuracy.

Key words: community integrated energy system; gas-electricity coupling; projective integration; dynamic simulation; stiff system



Fig.A1 Prime motor of split-shaft microturbines



Fig.A2 Algorithm flowchart



Fig.A4 Dynamics with fluctuating wind power

Table A2 Comparison of simulation time				
求解方法	参数设置	时间/s		
小步长欧拉法	$\Delta t = 0.001 s$	848.41		
	$\Delta t$ =0.001s, k=50, M <sub>0</sub> =50	504.04		
投影积分	$\Delta t$ =0.001s, k=100, M <sub>0</sub> =50	583.18		
	$\Delta t$ =0.001s, k=100, M <sub>0</sub> =25	700.22		

表 A2 求解时间比较



图 A5 电磁功率相对误差 Fig.A5 Relative error of electromagnetic power

表 A3 算法性能比较 Table A3 Algorithm performance comparison

Tuote i la Fingorium periormanee comparison					
求解方法	参数设置	时间/s	最大误差		
小步长欧拉法	$\Delta l=25$ m, $\Delta t=0.001$ s	848.41	0		
	$\Delta l$ =50m, $\Delta t$ =0.005s	92.23	$3.05 \times 10^{-3}$		
投影积分	$\Delta l$ =50m, $\Delta t$ =0.001s	457.90	3.03×10 <sup>-6</sup>		
	$\Delta l=25$ m, $\Delta t=0.001$ s	583.18	2.92×10 <sup>-6</sup>		