

# 电-气多能源微网能流差异化求解

彭寒梅, 刘健锋, 李才宝, 苏永新, 谭 貌

(湘潭大学自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 多能源微网可实现配网/用户侧的多能源互联,是实现能源利用提质增效的重要切入点。本文针对多能源微网中EH运行模式的多样性,及电力网络与天然气网络能流特性的差异,提出一种电-气多能源微网能流差异化求解方法:分解求解电力网络与天然气网络,基于解析函数递推求解电力网络能流,采用线性逼近法求解天然气网络能流。对EH进行节点类型处理,建立其能流计算模型;求解电力网络时,构造电力节点的解析函数方程,将未知变量的解析函数表示成幂级数,递推求解出其有限项幂级数的系数,再构造有限项幂级数的Padé近似式判断解的可行性。对电-气多能源微网算例系统采用所提方法进行能流计算,验证其正确性和有效性。

**关键词:** 多能源微网; 能流计算; 差异化求解; 解析函数; 递推求解

**DOI:** 10.12067/ATEEE2011016

**文章编号:** 1003-3076(2021)05-0010-12

**中图分类号:** TM74

## 1 引言

在全球环境问题与能源危机日益凸显的背景下,为实现能源利用的提质增效,由传统的分产分供能源系统向涉及电、气、热、冷等能源形式的全面转型已成为必然趋势<sup>[1-3]</sup>。综合能源系统(Integrated Energy System, IES)可实现电能、天然气能源和热能等多能源的协同供应,有效提高分布式可再生能源的就地消纳能力,在满足用户需求的前提下减少对外电网的依赖,得到了广泛的研究与关注<sup>[4-8]</sup>。电-气多能源微网是面向终端用户电、热等多种用能需求,覆盖源、网、荷、储等各个环节,互补利用传统电能、天然气能源和新型能源的一种小型 IES。

电-气多能源微网由电力网络、天然气网络和耦合元件能源集线器(Energy Hub, EH)构成。EH是实现不同类型能源互联以及满足用户终端多类型用能需求的重要基础设施,其接入打破了微网中不同类型能源系统原有的物理隔离性<sup>[9,10]</sup>。基于热电联产系统的EH可以运行于2种模式<sup>[11,12]</sup>:以热定电(Following the Thermal Load, FTL)和以电定热(Following the Electric Load, FEL)。电-气多能源微网中的电力网络可并网也可孤岛运行,并网运行下EH

可运行于FTL或FEL模式;孤岛运行下可将电力平衡节点设在某一EH处,该EH运行于FEL模式,此时电力网络为主从控制,也可将电力平衡由多个下垂控制的分布式电源(Distributed Generator, DG)承担<sup>[13-15]</sup>,EH可运行于FTL或FEL模式,此时电力网络为对等控制。

确定性能流计算是IES运行分析的重要基础,可为IES的设备选址定容、运行决策和故障分析等提供依据<sup>[16,17]</sup>。目前IES确定性能流计算方法主要分为统一求解法和分解求解法两类,且这两类均基于Newton-Raphson(N-R)法进行迭代求解。统一求解法是将不同子系统的能流方程联立在一起进行整体求解。分解求解法是在考虑IES耦合因素的基础上将电力网络、天然气网络和热力网络能流分别进行求解。文献[11]采用交替求解进行不同运行模式下的区域综合能源系统电/气/热混合能流计算。文献[18]建立含电、热、气的多能流混合模型,提出一种基于扩展N-R法的多能流统一求解方法。文献[19]建立耦合环节数学表达,采用N-R法对大规模综合能源系统进行多能流解耦计算。统一求解法计算工作量大,计算速度慢,收敛性差;分解求解法相比于统一求解法具有更好的收敛性。但文献

**收稿日期:** 2020-11-13

**基金项目:** 湖南省自然科学基金(2020JJ4580)

**作者简介:** 彭寒梅(1979-),女,湖南籍,副教授,博士,研究方向为电力系统潮流计算、智能电网弹性评估与分析;  
刘健锋(1995-),男,广西籍,硕士研究生,研究方向为综合能源系统潮流计算与分析。

[11,18,19]均采用 N-R 法进行求解。电-气多能源微网的天然气网络一般有一个作为气平衡节点的气源,能流易于收敛,然而 N-R 法求解需对非恒定雅可比矩阵进行多次逆运算,计算量较大。电力网络无电力平衡节点下能流收敛域范围窄,会出现 N-R 法难以解决的问题:①雅可比矩阵可能出现不可逆的情况,导致算法失效;②系统是否确实无可行解?还是系统存在可行解但求解算法无法找到可行的解?

线性逼近法将问题线性化,相较于 N-R 法计算效率得到提高<sup>[20]</sup>。交流电路正弦量可用相量来表示,相量表示法的基础是复数,即可用复数表示正弦量。复变函数是自变量为复数的函数,解析函数是复变函数研究的主要对象,它在理论和实际问题中有着广泛的应用<sup>[21,22]</sup>。解析函数的重要特征之一是它可在其定义区域中以幂级数来表示。基于解析函数,可将电力网络中的复数变量引入到能流方程中<sup>[23-25]</sup>,使其具有解析连续性,进而可将电力网络非线性能流方程组的求解转换为解析函数方程的求解,其不依赖初始值,不需要求解雅可比矩阵,可克服 N-R 法求解电力网络能流带来的困难。

本文针对多能源微网中 EH 与电力网络的运行模式多样性,以及天然气网络与电力网络能流特性的差异,提出一种电-气多能源微网能流差异化求解方法。对 EH 进行节点类型处理,在此基础上分解求解电力网络与天然气网络,采用线性逼近法求解天然气网络能流,采用解析函数法求解电力网络能流。最后算例应用验证所提方法的正确性和有效性。

## 2 能源集线器能流模型及节点类型

本文基于耦合元件 EH 的节点处理,将含多 EH 节点的电-气多能源微网进行电气解耦,在此基础上,采用分解求解法计算电-气多能源微网确定性能流,即分开求解电力网络与天然气网络。

### 2.1 EH 能源耦合关系

电-气多能源微网由分布于一个区域内的电力网络、天然气网络和作为耦合环节的多能源转换设备构成,如图 1 所示,主要包含电力线路、DG、能源集线器 EH,天然气管道,压缩机及电力、气、热负荷等。随着能源形态发展,电-气多能源微网内分布式能源节点和用户节点数量不断增加,网络结构逐渐向复杂网络转化,并呈现多节点耦合特点。电-气多

能源微网中的天然气网络有一个起平衡作用的气源,为主从控制;其电力网络可并网也可孤岛,孤岛模式下有主从控制和对等控制两种方式。

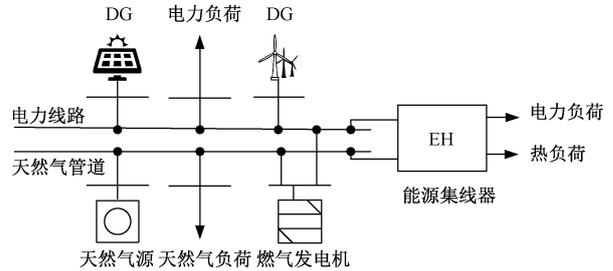


图 1 电-气多能源微网结构

Fig.1 Electric-gas multi-energy microgrid structure

电-气多能源微网中电、气能源的耦合是通过 EH 实现的。EH 存在不同的结构和组成方式,本文考虑 EH 的结构及能源耦合关系如图 2 所示,包含电力变压器、微型燃气轮机 (Micro-Turbine, MT) 和燃气锅炉 (Gas Boiler, GB)。

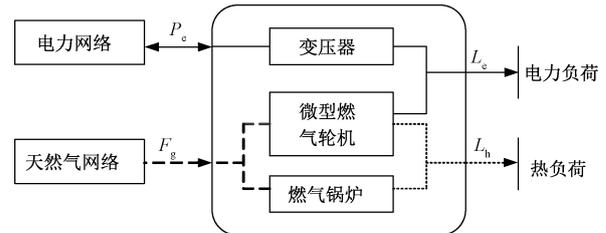


图 2 EH 结构及能源耦合关系

Fig.2 Structure and energy coupling relationship of EH

图 2 EH 的耦合关系为:

$$L_e = \eta_T P_e + v_{MT} \eta_{e,MT} F_g \quad (1)$$

$$L_h = v_{MT} \eta_{h,MT} F_g + (1 - v_{MT}) \eta_{GB} F_g \quad (2)$$

式中,  $L_e$ 、 $L_h$  分别为 EH 的电力负荷和热负荷;  $P_e$ 、 $F_g$  分别为 EH 所需的电功率和天然气流量;  $\eta_{e,MT}$  和  $\eta_{h,MT}$  分别为天然气经 MT 转化为电能和热能的转换效率;  $\eta_T$ 、 $\eta_{GB}$  分别为电力变压器和燃气锅炉的效率;  $v_{MT}$  为天然气分配系数,  $0 \leq v_{MT} \leq 1$ 。

### 2.2 节点类型处理

对节点进行分类是能流计算的前提和基本步骤。根据电-气多能源微网的运行特性,进行节点类型处理:

(1) 将天然气网络中的气源处理为气平衡节点,其余节点处理为气负荷节点。

(2) 将电力网络中下垂控制的 DG 处理为下垂节点,由此形成电力网络 4 种电力节点类型:电力平衡节点、PQ 节点、PV 节点和下垂节点。

(3)耦合元件EH的节点处理:对于天然气网络将其处理为气负荷节点;对于电力网络,将承担电功率平衡的EH处理为电力平衡节点,其他情况下处理为PQ节点。

EH运行于FTL模式下,可作为电力网络的PQ节点(未知量 $P_e$ )和天然气网络的气负荷节点(未知量 $F_g$ ),此时EH所需的天然气流量由热负荷决定,不足的电功率由电力网络供给。其节点处理及能流计算模型如式(3)、式(4)所示。

$$\text{EH(FTL)} \begin{cases} \text{PQ节点(电力网络): } P_e \\ \text{气负荷节点(天然气网络): } F_g \end{cases} \quad (3)$$

$$L_h \xrightarrow{\text{式(2)}} F_g \xrightarrow[\text{给定 } L_e]{L_e > \eta_T P_e + v_{MT} \eta_{e,MT} F_g} P_e \quad (4)$$

EH运行于FEL模式下,可作为电力网络的PQ节点、电力平衡节点和天然气网络的气负荷节点。PQ节点下EH所需的天然气流量由电力负荷决定,电力负荷如超出MT的发电容量,则差额由电力网络补充;电力平衡节点下,EH所需的天然气流量由电力网络所需的电平衡功率决定。其节点处理及能流计算模型如式(5)、式(6)所示。

$$\text{EH(FEL)} \begin{cases} \text{平衡节点(电力网络): } P_e \\ \text{PQ节点(电力网络): } P_e \\ \text{气负荷节点(天然气网络): } F_g \end{cases} \quad (5)$$

$$L_e \xrightarrow[\text{PQ节点:式(2)、给定 } P_{e,MT}^{\max}]{\text{电力平衡节点:求解电力网络}} P_e = \begin{cases} P_s \\ 0 \\ L_e - P_{e,MT}^{\max} \end{cases}$$

$$\xrightarrow[\text{给定 } L_e]{L_e = \eta_T P_e + v_{MT} \eta_{e,MT} F_g} F_g$$

$$\xrightarrow[L_h > v_{MT} \eta_{h,MT} F_g + (1 - v_{MT}) \eta_{GB} F_g]{L_e = \eta_T P_e + v_{MT} \eta_{e,MT} F_g} F_g \quad (6)$$

式中, $P_{e,MT}^{\max}$ 为MT的最大发电容量; $P_s$ 为电力网络所需的电平衡功率。

### 3 基于线性逼近法的天然气网络能流计算

#### 3.1 天然气网络能流模型

天然气网络主要包含天然气管道、压缩机及气负荷,其两节点模型如图3所示。天然气由气源进入管道,通过管网输送到能源集线器和气负荷。

由天然气网络的流量连续性方程、管道压降和节点压力关系及管道流量与压降的关系,得到能流模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{AF} = \mathbf{L} \\ \Delta \mathbf{\Pi} = -\mathbf{A}^T \mathbf{\Pi} \\ \Delta \mathbf{\Pi}_{ij} = p_i^2 - p_j^2 = K_{ij} F_{ij}^m \end{cases} \quad (7)$$

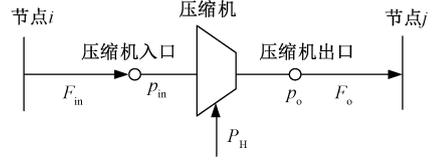


图3 含压缩机的天然气管道模型

Fig.3 Model of natural gas pipeline with compressor

式中, $\mathbf{A}$ 为天然气网络的节点-管道关联矩阵; $\mathbf{F}$ 为管道流量向量; $\mathbf{L}$ 为节点的气负荷向量; $p$ 为节点压力; $\Pi_i = p_i^2$ ; $\Delta \mathbf{\Pi}$ 为管道压降; $i, j$ 为天然气网络节点编号; $K$ 为管道常数; $m$ 为流动指数。

压缩机按所需功率来源不同可分为电压缩机和气压缩机,其原动机所需功率为:

$$P_H = \frac{F_{in} \alpha}{\eta_H (\alpha - 1)} \left[ \left( \frac{p_o}{p_{in}} \right)^{(\alpha-1)/\alpha} - 1 \right] \quad (8)$$

式中, $P_H$ 为压缩机原动机功率; $F_{in}$ 为压缩机入口流量; $\alpha$ 为多变指数; $p_o, p_{in}$ 分别为压缩机的出口压力和入口压力。

独立的微型燃气轮机作为天然气网络的气负荷节点,其消耗的天然气流量 $F_{MT}$ 与发出的电功率 $P_{MT}$ 关系为:

$$P_{MT} = \mu (F_{MT}) F_{MT} H = C_1 F_{MT}^3 + C_2 F_{MT}^2 + C_3 F_{MT} \quad (9)$$

式中, $\mu$ 为燃气轮机的效率,可表述成燃气流量的二次函数; $H$ 为天然气的燃烧值; $C_1, C_2$ 和 $C_3$ 为根据不同微型燃气轮机特征而定的常数。

#### 3.2 线性逼近法求解

式(7)、式(8)中,已知气源和压缩机出口的压力、各节点的气负荷,待求变量为:气节点压力 $p_i$ 和压缩机原动机所需的功率 $P_H$ 、管道流量 $F_{ij}$ 。线性逼近法是一个求解线性方程组的过程。由式(7)可得到以节点压力为待求变量的线性方程:

$$\mathbf{AGA}^T \mathbf{\Pi} = \mathbf{L} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{G} = 1/(\mathbf{K}|\mathbf{F}|^{m-1})$ 。

设置管道流量初值 $\mathbf{F}^{(0)}$ 后,令 $\mathbf{Y} = \mathbf{AGA}^T$ ,按式(11)进行迭代计算,得到待求变量的值。

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^{(k)} \mathbf{\Pi}^{(k)} = \mathbf{L}^{(k)} \\ \Delta \mathbf{\Pi}^{(k)} = -\mathbf{A}^T \mathbf{\Pi}^{(k)} \\ \mathbf{F}^{(k+1)} = \mathbf{G}^{(k)} \Delta \mathbf{\Pi}^{(k)} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

### 4 基于解析函数的电力网络能流计算

#### 4.1 电力网络能流模型

电力系统的交流潮流模型较多采用节点功率方

程来描述:

$$\dot{V}_i \sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k^* = P_i + jQ_i \quad (12)$$

式中,  $\dot{V}_i$  为节点  $i$  的电压相量;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  的注入有功和无功功率;  $N$  为节点个数;  $Y_{ik}$  为线路的导纳, 符号“\*”表示相量的复共轭。

已知节点注入功率  $P_i$ 、 $Q_i$ , 将  $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$  和  $\dot{V}_i = V_i \angle \delta_i$  代入式 (12) 中, 转化为求解实部有功功率方程和虚部无功功率方程:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{k=1}^N V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \\ Q_i = V_i \sum_{k=1}^N V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{cases} \quad (13)$$

此时潮流方程为一组非线性方程。N-R 法是常用的求解非线性方程组的方法之一, 但初值选取不适当、雅可比矩阵奇异都会给求解带来困难。

#### 4.2 构建电力节点解析函数方程

复变函数理论中, 如果复变函数  $f(s)$  ( $s = x + jy$ ,  $x, y$  为实数) 在复平面内其定义区域  $D$  中的一点  $s_0$  及  $s_0$  的邻域内处处可导, 那么称  $f(s)$  在  $s_0$  解析。如果复变函数  $f(s)$  在定义区域  $D$  内每一点解析, 那么称  $f(s)$  是  $D$  内的一个解析函数<sup>[21]</sup>。解析函数具有 2 个重要特性: ①一个解析函数具有任意阶导数; ②任何解析函数都一定能用幂级数来表示。复变函数  $f(s)$  展开成  $s$  的幂级数为:

$$f(s) = f[0] + f[1]s + \dots + f[n]s^n + \dots \quad (14)$$

式中,  $f[0]$ 、 $f[1]$ 、 $\dots$ 、 $f[n]$  是幂级数的系数, 为待定的复数。

在传统电力系统节点功率方程复数表示的基础上, 结合解析函数, 构造电-气微网中电力网络 PQ 节点、PV 节点、下垂节点的解析函数方程和平衡节点的解析函数式。

构造 PQ 节点的解析函数方程为式 (15), 将  $V_i^*$  构造为  $V_i^*(s^*)$  而非  $V_i^*(s)$ , 目的是为了保留其解析连续性。

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k(s) = \frac{s \tilde{S}_i^*}{V_i^*(s^*)} \quad i \in \text{PQ 节点编号} \quad (15)$$

式中,  $V_i(s)$  为节点电压的解析函数;  $\tilde{S}_i$  为节点  $i$  的注入复功率。

构造 PV 节点的解析函数方程为:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k(s) = \frac{s P_i - j Q_i(s)}{V_i^*(s^*)} \\ V_i(s) \cdot V_i^*(s^*) = 1 + s(|\dot{V}_i|^2 - 1) \end{cases} \quad i \in \text{PV 节点编号} \quad (16)$$

式中,  $|\dot{V}_i|$  为 PV 节点  $i$  的电压幅值;  $Q_i(s)$  为节点  $i$  的无功功率解析函数。

构造下垂节点的解析函数方程为:

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k(s) = \frac{K_w(\omega_0 - \omega(s)) - jK_v(V_0 - V_i(s)) - s \tilde{S}_{Li}^*}{V_i^*(s^*)} \quad i \in \text{下垂节点编号} \quad (17)$$

式中,  $K_w$ 、 $K_v$  分别为有功和无功功率的下垂系数;  $\omega_0$  为设定频率值;  $V_0$  为下垂控制 DG 的额定输出电压幅值;  $\tilde{S}_{Li}$  为节点负荷功率;  $\omega(s)$  为系统稳态频率解析函数。

构造平衡节点电压的解析函数为:

$$V_i(s) = 1 + (\dot{V}_i - 1)s \quad i \in \text{平衡节点编号} \quad (18)$$

由节点解析函数方程式 (15) ~ 式 (18) 构成电力网络的能流模型。式 (15) 中, 对于 PQ 节点: 节点注入复功率已知, 待求的是  $V_i(s)$ 。式 (16) 中, 对于 PV 节点: 节点有功功率已知, 待求的是  $V_i(s)$  和  $Q_i(s)$ 。式 (17) 中, 对于下垂节点: 节点负荷功率已知, 待求的是  $V_i(s)$ 、 $\omega(s)$ 。

#### 4.3 幂级数系数的递推求解

解析函数  $V_i(s)$ 、 $Q_i(s)$ 、 $\omega(s)$  在  $s=1$  处的解为电力网络的能流解, 但直接求解解析函数存在困难, 为此将  $V_i(s)$ 、 $Q_i(s)$ 、 $\omega(s)$  表示成幂级数, 利用幂级数各项系数之间的递推关系进行求解。

对于 PQ 节点, 将式 (15) 中  $V_k(s)$  展开成  $s$  的幂级数:

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} (V_k[0] + V_k[1]s + \dots + V_k[n]s^n + \dots) = s \tilde{S}_i^* \cdot (W_i^*[0] + W_i^*[1]s + \dots + W_i^*[n]s^n + \dots) \quad i \in \text{PQ 节点编号} \quad (19)$$

式中,  $W_i(s)$  为  $V_i(s)$  的倒数, 即:

$$W_i(s) = \frac{1}{V_i(s)} = W_i[0] + W_i[1]s + \dots + W_i[n]s^n + \dots \quad (20)$$

由式 (19) 等号两侧关于  $s$  的系数相等可得到:

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k[n] = \tilde{S}_i^* W_i^*[n-1] \quad i \in \text{PQ 节点编号} \quad (21)$$

将式(20)中的  $V_i(s)$  展开成  $s$  的幂级数,并由其等号两侧关于  $s$  的系数相等,得到  $W_i[n]$  与  $V_i[n]$  之间的递推关系:

$$\begin{cases} W_i[0] = \frac{1}{V_i[0]} \\ W_i[n] = -\frac{\sum_{k=0}^{n-1} W_i[k] V_i[n-k]}{V_i[0]} \quad n \geq 1 \end{cases} \quad (22)$$

PQ 节点  $V_i(s)$  的幂级数系数的递推求解过程如下:

- (1) 由式(15)、式(16)和式(18)求解出 PQ 节点  $V_i(s)$  的幂级数的常数项  $V_i[0]$ ;
- (2) 根据式(22),由  $W_i[a]$  ( $a \leq n-2$ )、 $V_i[b]$  ( $b \leq n-1$ ) 计算出  $W_i[n-1]$ ;
- (3) 根据式(21),由  $W_i[n-1]$  计算出  $V_i[n]$ ;
- (4) 递推步骤(2)和步骤(3)。

对于 PV 节点,将式(16)中的  $V_k(s)$  和  $Q_i(s)$  展开成  $s$  的幂级数,并由其展开式等号两侧关于  $s$  的系数相等,将电压幂级数的系数分解为实部和虚部,得到:

$$\sum_{k=1}^N [(G_{ik} V_{kre}[n] - B_{ik} V_{kim}[n]) + j(B_{ik} V_{kre}[n] + G_{ik} V_{kim}[n])] = P_i W_i^*[n-1] - j \left( \sum_{k=0}^n Q_i[k] W_i^*[n-k] \right) \quad i \in \text{PV 节点编号} \quad (23)$$

$$\begin{cases} V_{ire}[0] = 1 \\ V_{ire}[1] = \frac{|\dot{V}_i^{sp}|^2 - 1}{2} \quad i \in \text{PV 节点编号} \\ V_{ire}[n] = -\frac{1}{2} \left( \sum_{k=1}^{n-1} V_i[k] V_i^*[n-k] \right) \quad n \geq 2 \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $V_{kre}[n]$ 、 $V_{kim}[n]$  分别为节点  $k$  的电压幂级数第  $n$  项系数的实部和虚部。

PV 节点  $V_i(s)$ 、 $Q_i(s)$  的幂级数系数的递推求解过程如下:

- (1) 由式(15)、式(16)和式(18)求解出 PV 节点  $V_i(s)$ 、 $Q_i(s)$  的幂级数的常数项  $V_i[0]$ 、 $Q_i[0]$ ;
- (2) 根据式(22),由  $W_i[a]$  ( $a \leq n-2$ )、 $V_i[b]$  ( $b \leq n-1$ ) 计算出  $W_i[n-1]$ ;
- (3) 由式(24)计算出  $V_{ire}[n]$ ;
- (4) 根据式(23),由  $W_i[n-1]$ 、 $V_{ire}[n]$  计算出  $V_{im}[n]$  和  $Q_i[n]$ ;
- (5) 递推步骤(2)~(4)。

同理,对于下垂节点,将式(17)中的  $V_k(s)$ 、 $\omega(s)$  展开成  $s$  的幂级数,并由其展开式等号两侧关于  $s$  的系数相等,得到:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k[n] &= -K_w \sum_{k=1}^n \omega[k] W_i^*[n-k] - \tilde{S}_{Li}^* W_i^*[n-k] + \\ jK_v \sum_{k=1}^n V_i[k] W_i^*[n-k] & \quad i \in \text{下垂节点编号} \end{aligned} \quad (25)$$

下垂节点  $V_i(s)$ 、 $\omega(s)$  的幂级数系数的递推求解过程如下:

- (1) 由式(15)、式(16)和式(17)求解出下垂节点  $V_i(s)$ 、 $\omega(s)$  幂级数的常数项  $V_i[0]$ 、 $\omega[0]$ ;
- (2) 根据式(22),由  $W_i[a]$  ( $a \leq n-2$ )、 $V_i[b]$  ( $b \leq n-1$ ) 计算出  $W_i[n-1]$ ;
- (3) 根据式(25),由  $W_i[n-1]$ 、 $V_{im}[n]$  计算出  $V_{ire}[n]$  和  $\omega[n]$ ;
- (4) 递推步骤(2)和步骤(3)。

#### 4.4 基于 Padé 近似式的可行解判别

构造电力网络的节点解析函数方程,递推求解出未知解析函数 ( $V_i(s)$ 、 $Q_i(s)$ 、 $\omega(s)$ ) 的有限项幂级数的系数。然而有限项幂级数的收敛域比实际幂级数收敛域的范围小,直接将有限项幂级数求和不能确保解的精度和可行性。为此提出构造有限项幂级数的 Padé 近似式,以扩展有限项幂级数的收敛域。根据 Stahl 的理论,Padé 近似式可确保幂级数的最大解析连续性及其解的唯一性<sup>[26,27]</sup>。对于给定形式的幂级数,构造一个有理函数,当且仅当该幂级数与有理函数的幂级数展开式的前  $(L+M+1)$  项相同时,则构造的有理函数是该幂级数的 Padé 近似式。幂级数式(26)的 Padé 近似式为式(27)。

$$f(s) = c_0 + c_1 s + \cdots + c_{L+M} s^{L+M} + \cdots \quad (26)$$

$$f(s) \approx \frac{B_L(s)}{A_M(s)} = \frac{a_0 + a_1 s + \cdots + a_L s^L}{b_0 + b_1 s + \cdots + b_M s^M} \quad (27)$$

式中,  $B_L(s)/A_M(s)$  为构造的有理函数,  $B_L(s)$  和  $A_M(s)$  分别为  $s$  的  $L$  阶和  $M$  阶多项式,且  $L \leq M$ 。

设  $L=M$ ,  $b_0=1$ , 由式(26)与式(27)的前  $(L+M+1)$  项相等,得到式(28)和式(29),进而可计算出式(27)中的  $a_0, a_1, \cdots, a_L$ ,  $b_1, b_2, \cdots, b_M$ 。

$$\begin{bmatrix} c_L & c_{L-1} & \cdots & c_{L-M+1} \\ c_{L+1} & c_L & \cdots & c_{L-M+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{L+M-1} & c_{L+M-2} & \cdots & c_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} c_{L+1} \\ c_{L+2} \\ \vdots \\ c_{L+M} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} c_0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_1 & c_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_L & c_{L-1} & \cdots & c_{L-M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_L \end{bmatrix} \quad (29)$$

构造出  $V_i(s)$ 、 $Q_i(s)$ 、 $\omega(s)$  有限项幂级数的 Padé 近似式。若其 Padé 近似式在  $s=1$  处收敛,则该 Padé 近似式在  $s=1$  处的值为电力网络可行的能流解;若否,则该电力网络无能流解或无可行的能流解。

### 5 电-气多能源微网能流求解流程

本文提出的电-气多能源微网能流差异化求解流程如图 4 所示,分解求解电力网络与天然气网络,其中,基于解析函数递推求解电力网络能流模型,采用线性逼近法求解天然气网络能流模型,具体步骤如下:

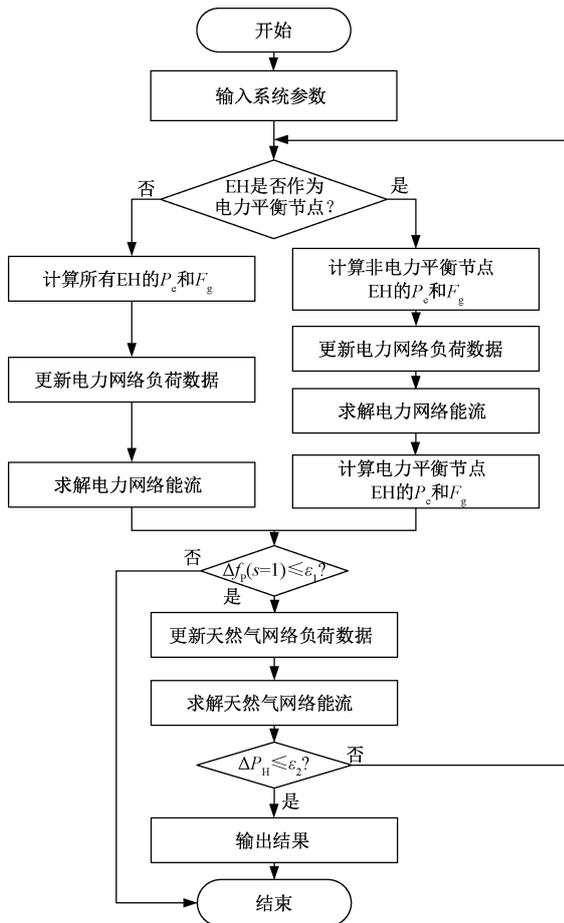


图 4 电-气多能源微网能流求解流程图

Fig.4 Flow chart of EFC for electric-gas multi-energy microgrid

(1)输入电力网络、天然气网络、EH、独立的微

型燃气轮机及压缩机的参数。

(2)判别 EH 的节点类型,若为非电力平衡节点,则根据给定的 EH 电负荷  $L_e$ 、热负荷  $L_h$ 、运行模式,由式(1)~式(6)计算出其所需电功率  $P_e$  和天然气流量  $F_g$ ;若为电力平衡节点,则其所需电功率和天然气流量在电力网络能流求解后计算得出。

(3)将非电力平衡节点 EH 所需的电功率  $P_e$  和电压缩机功率作为相关电力节点的负荷。

(4)采用解析函数法求解电力网络能流,若其  $n$  项幂级数与  $n+1$  项幂级数的 Padé 近似式在  $s=1$  处的值之差  $\Delta f_p(s=1)$  小于给定精度  $\epsilon_1$ ,则进入步骤(5);否则,该电力网络无可行能流解,结束计算。

(5)将 EH、独立的微型燃气轮机和气压缩机所需天然气流量作为相关节点的气负荷。

(6)采用线性逼近法求解天然气网络能流,求得压缩机原动机所需功率  $P_H$ ,并据此计算电压缩机的耗电量或气压缩机的耗气量。

(7)若更新前后的压缩机原动机功率之差  $\Delta P_H$  小于给定计算精度  $\epsilon_2$ ,则输出结果,否则返回步骤(3)。

### 6 算例分析

#### 6.1 算例系统

在配置为 G2020 处理器、1.95 G 内存的计算机上,采用软件 Matlab R2016a 编制本文提出的电-气多能源微网能流差异化求解程序。设置电-气多能源微网算例系统包含 17 节点电力网络 (EB1~EB17)、9 节点天然气网络 (GB1~GB9) 及 4 个能源集线器 (EH1~EH4),拓扑结构如图 5 所示。其中,电力网络中 DG2 和 DG3 为独立的微型燃气轮机 (由天然气网络供气),DG1 和 DG4 为其他形式能源发电机 (如光伏发电、风力发电);天然气网络中节点 1 为气平衡节点,GB4 与 GB6 之间设置一台恒出口压力的气压缩机;气节点 GB2、GB4、GB6、GB9 分别与电力网络节点 EB2、EB7、EB10、EB16 通过 EH 耦合。电力网络和天然气网络的线路参数及负荷参数见附表 1~3。

电力网络系统基准容量取为 100 kW,总负荷功率为  $0.9718+j0.3484$  pu,基准频率为 50 Hz,参考相位角为 0 rad,设置电力节点电压幅值范围为  $[0.94, 1.06]$  pu,稳态频率范围为  $[0.996, 1.004]$  pu。天然气网络中取气源节点 1 与气压缩机出口节点压力均为 80 bar,气压缩机的压缩比范围为  $[1.2,$

1.8],设置标准状态下流动指数  $m$  为 2、多变指数  $\alpha$  为 1.2。独立的微型燃气轮机中取  $C_1=C_2=0$ ,典型天然气的燃烧值  $H=39 \text{ MJ/m}^3$ ,燃气轮机的效率  $\mu=0.55$ 。EH 中各设备的能源转换效率均取为 0.9,天然气分配系数为 0.6,其余参数如表 1 所示。

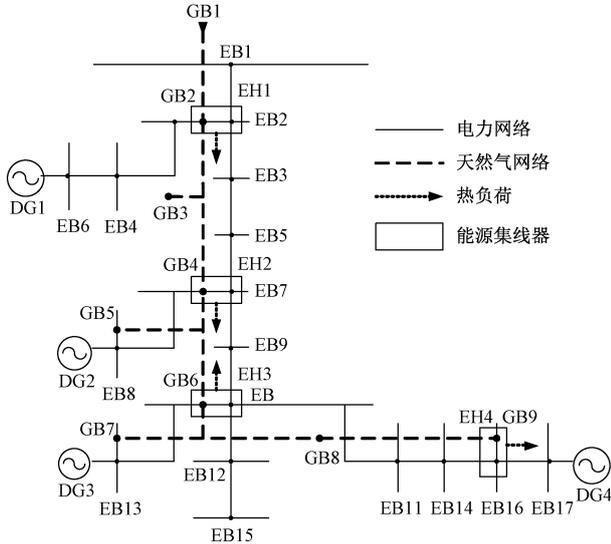


图 5 电-气多能源微网算例拓扑图  
Fig.5 Topology diagram of electric-gas multi-energy microgrid

表 1 能源集线器参数

Tab.1 Energy hub parameters

编号	连接的电力节点	连接的气负荷节点	热负荷 /MW	电负荷 (pu)	工作模式
EH1	2	2	0.30	0.20	FTL
EH2	7	4	0.30	0.20	FEL
EH3	10	6	0.20	0.30	FTL
EH4	16	9	0.20	0.30	FEL

## 6.2 电力网络主从控制下的能流计算结果

### 6.2.1 外部主网为电力平衡节点

设置电-气多能源微网算例系统中,电力节点 1 接入外部主网,作为电力平衡节点,给定电压 1.02 pu;电力节点 8 为 PV 节点,给定电压幅值 1.01 pu;其余电力节点均为 PQ 节点,给定 DG1~DG4 的注入功率分别为  $0.3+j0.1 \text{ pu}$ 、 $0.15+j0.05 \text{ pu}$ 、 $0.25+j0.1 \text{ pu}$ 、 $0.2+j0.1 \text{ pu}$ 。设置方法一:本文提出的电-气多能源微网能流差异化求解方法;方法二:基于 N-R 法的电-气多能源微网能流计算方法。分别采用方法一、方法二对电-气多能源微网算例系统进行能流求解。由于电力平衡节点为外部主网下,EH 节点类型为 PQ 节点,则 2 种方法下都是先单独求

解 EH 的未知变量,计算结果相同,如表 2 所示。2 种不同方法下天然气管道流量、压降,电力节点电压幅值、相角的计算结果见附表 4 和 5,计算得到的 PV 节点注入无功功率分别为 0.221 095 pu 和 0.221 379 pu。

表 2 电力平衡节点为外部主网下 EH 能流计算结果

Tab.2 EF calculation results of EHs when power balance node is external power network

编号	电功率 (pu)	天然气流量/( $\text{m}^3/\text{h}$ )
EH1	0.021 053	333.333 333
EH2	0.000 000	370.370 370
EH3	0.189 474	222.222 222
EH4	0.000 000	555.555 556

仿真分析:①由表 2 可知,计算出的 EH3 与 EH4 所需电功率  $P_e$  和天然气流量  $F_g$  不同,EH3 需由电力网络提供  $P_e$ ,EH4 消耗的  $F_g$  比 EH3 多,这是由于:EH3 和 EH4 的电负荷和热负荷相同,但其工作模式不同,导致  $P_e$ 、 $F_g$  的计算模型不同。②由附表 4 和 5 可知,方法一下计算得到的天然气管道流量、压降,电力节点电压幅值、相角及 PV 节点注入无功功率与方法二下计算的结果差值小,相对误差均小于 0.01%,且计算时间均得到减少,验证了本文提出的电-气多能源微网能流差异化求解方法的正确性。

### 6.2.2 EH 为电力网络平衡节点

设置电-气多能源微网算例系统中去掉电力节点 1(共含 16 个电力节点),电力节点 17 不接 DG 装置,系统为离网型,即电力网络运行于孤岛模式;设置 EH1 运行于 FEL 模式,作为电力平衡节点,给定电压为 1.02 pu,系统其他参数不变。采用本文提出的电-气多能源微网能流差异化求解方法,求解出的能源集线器所需的电功率和天然气流量如表 3 所示,电力节点电压幅值、节点注入功率如图 6 所示,天然气管道流量和气节点压力如图 7 所示。

表 3 EH 为电力网络平衡节点下 EH 能流计算结果

Tab.3 EF calculation results of EHs when power network balance node is EH

编号	电功率 (pu)	天然气流量/( $\text{m}^3/\text{h}$ )
EH1	-0.224 651	437.916 134
EH2	0.000 000	370.370 370
EH3	0.189 474	222.222 222
EH4	0.000 000	555.555 556

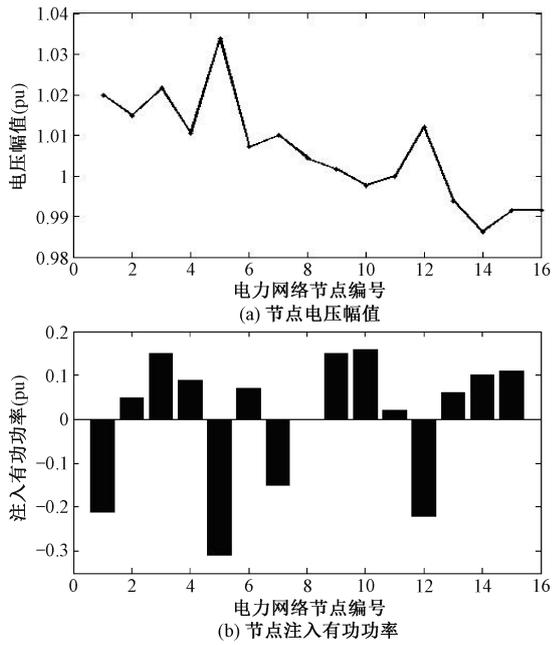


图6 电力网络能流计算结果  
Fig.6 EF calculation results of power network

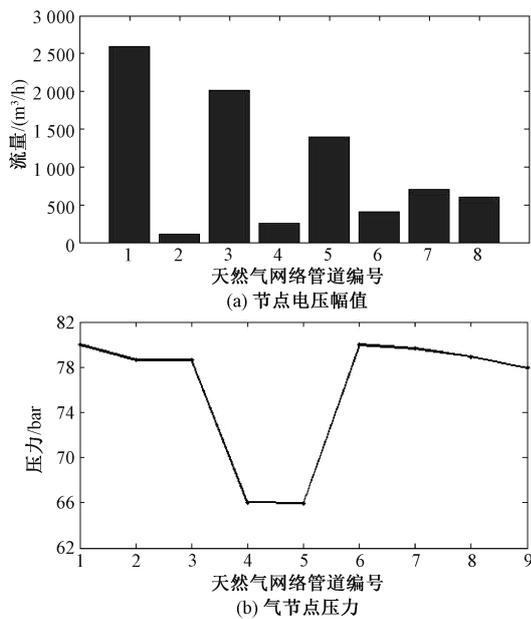


图7 天然气网络能流计算结果  
Fig.7 EF calculation results of natural gas network

仿真分析:①比较表2与表3可知,EH1所需电功率 $P_e$ 由0.021 053 MW变为-0.224 651 MW,且消耗的 $F_g$ 增大,这是由于:EH1节点类型由PQ节点变为电力平衡节点,在电力平衡节点下,需能源集线器发出电功率以平衡电力网络,其天然气流量由电力网络所需的平衡功率决定。符合理论分析。②由图6可知,含DG的电力节点及

电力平衡节点的注入功率为负值,表明能流计算结果的正确性。

### 6.3 电力网络对等控制下的能流计算结果

设置电-气微网算例系统中,电力节点EB8、EB13为下垂节点,EB17设为参考相位节点,其余均为PQ节点;下垂控制DG的额定频率和输出电压幅值分别取为 $f_0 = 1\text{pu}$ 、 $V_0 = 1\text{pu}$ ,下垂系数 $K_w$ 、 $K_v$ 分别为250、20;系统其他参数不变,此情况下,电力网络为对等控制。采用方法二对其进行能流计算,计算不收敛,无法判别:系统是否确实无可行解?还是系统存在可行解但求解算法无法找到可行的解?采用本文提出的电-气多能源微网能流计算方法,求解出的电力网络系统频率为0.998 939 pu,电力节点电压幅值如附表6所示,天然气管道流量、节点压力如附表7所示。由于该算例系统不含作为电力平衡节点的EH,则计算出的能源集线器所需的电功率和天然气流量与外部主网为电力平衡节点下相同,如表2所示。电力网络不同运行模式下的能流计算结果对比如图8所示。

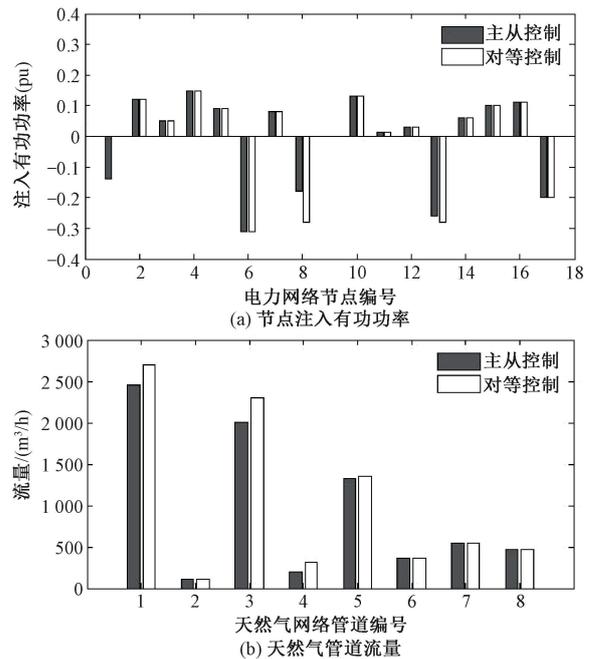


图8 不同运行模式下的能流计算结果  
Fig.8 EF calculation results under different operating modes

仿真分析:

(1)由图8可知,下垂节点EB8、EB13的注入功率均为-0.265 pu,这是由于其下垂系数设置相同;EB8、EB13的注入功率绝对值较外部主网为电力平衡节点下增大(分别增加0.115 2 pu、0.015 2 pu),

两者增加的值等于外部主网为电力平衡节点下电力节点 EB1 的注入功率绝对值 0.130 4 pu, 表明对等控制下电力网络功率由下垂节点共同平衡, 符合理论分析。

(2) 比较附表 4 与附表 7 可知, 对等控制、外部主网为电力平衡节点下气源注入的天然气流量分别为 2 733. 733 948 m<sup>3</sup>/h、2 467. 130 854 m<sup>3</sup>/h, 这是由于下垂节点 EB8、EB13 为独立的微型燃气轮机, 由天然气网络供气, 导致所需气源注入的天然气流量增加, 而外部主网为电力平衡节点下系统缺额的电功率由外部主网提供。

## 7 结论

本文提出一种电-气多能源微网能流差异化求解方法。结合能源集线器的运行模式及节点类型, 建立能源集线器的能流计算模型; 分解求解电力网络与天然气网络, 利用天然气网络中管道流量与压降的关系, 采用一种线性逼近法求解天然气网络能流; 针对电力网络能流的复值特性, 采用一种解析函数法求解电力网络能流。算例结果及分析表明:

(1) 提出的能源集线器能流计算模型, 考虑了能源集线器运行模式及节点类型的多样性, 能反映其耦合不同类型能源的特性及作用, 符合工程实际。

(2) 提出的电-气多能源微网能流差异化求解方法, 天然气网络能流采用线性逼近法求解, 不需要每次迭代对雅可比矩阵进行逆运算, 可减少计算量, 提高收敛速度; 电力网络能流采用基于解析函数递推求解, 不依赖初始值且不需要求解雅可比矩阵, 可克服初始值选取不适当及雅可比矩阵奇异所带来的能流计算困难, 且不需要迭代求解, 可加快计算时间, 并能判别系统是否存在能流解。该求解方法适用于不同运行模式的含多耦合节点综合能源系统求解, 且可为收敛困难的综合能源系统确定性能流计算提供新的思路。

电-气多能源微网确定性能流计算结果, 对其规划设计与运行调度有重要的指导意义, 具有很好的工程应用价值。

## 参考文献 (References):

[1] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等 (Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al.). 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 (Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet) [J]. 中国电机

- 工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (12): 3292-3305.
- [2] Chen X, Mcelroy M B, Kang C. Integrated energy systems for higher wind penetration in china: formulation, implementation and impacts [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33 (2): 1309-1319.
- [3] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等 (Zeng Ming, Liu Yingxin, Zhou Pengcheng, et al.). 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望 (Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (6): 1697-1708.
- [4] Wang J, Zhong H, Ma Z, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system [J]. Applied Energy, 2017, 202 (9): 772-782.
- [5] Mashayekh S. Security constrained design of isolated multi-energy microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33 (3): 2452-2462.
- [6] Manshadi S, Khodayar M. Resilient operation of multiple energy carrier microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (5): 2283-2292.
- [7] 李美成, 梅文明, 张凌康, 等 (Li Meicheng, Mei Wenming, Zhang Lingkan, et al.). 基于可再生能源不确定性的多能源微网调度优化模型研究 (Research on multi-energy microgrid scheduling optimization model based on renewable energy uncertainty) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2019, 43 (4): 1260-1270.
- [8] 龚思丞, 黄文焘, 邵能灵, 等 (Gong Sicheng, Huang Wentao, Tai Nengling, et al.). 基于复杂网络的电热微网拓扑综合评估方法 (Comprehensive evaluation method of electric heating microgrid topology based on complex network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2019, 43 (23): 173-184.
- [9] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等 (Ma Tengfei, Wu Junyong, Hao Liangliang, et al.). 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析 (Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (1): 179-186.
- [10] 盛万兴, 李鹏华, 段青, 等 (Sheng Wanxing, Li Penghua, Duan Qing, et al.). 基于 Lyapunov 优化方法的含能量路由器的能源集线器能量管理策略研究 (Research on energy management strategy of energy hub with energy router based on Lyapunov optimization method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2019, 39 (21): 6212-6225.
- [11] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等 (Xu Xiandong, Jia

- Hongjie, Jin Xiaolong, et al.). 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究 (Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (14): 3634-3642.
- [12] 刘志欣, 程林, 周章, 等 (Liu Zhixin, Cheng Lin, Zhou Zhang, et al.). 基于场景聚类分析的综合能源系统鲁棒运行策略 (Robust operation strategy of multi-energy system based on scenario clustering analysis) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (10): 9-19.
- [13] 肖朝霞 (Xiao Zhaoxia). 微网控制及运行特性分析 (Control and operation characteristic analysis of a micro-grid) [D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2008.
- [14] 彭寒梅, 曹一家, 黄小庆, 等 (Peng Hanmei, Cao Yijia, Huang Xiaoqing, et al.). 无平衡节点孤岛运行微电网的连续潮流计算 (Continuous power flow for islanding microgrid without balance nodes) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (8): 2057-2067.
- [15] 彭寒梅, 郭颖聪, 昌玲, 等 (Peng Hanmei, Guo Yingcong, Chang Ling, et al.). 基于系统短期时序状态转移抽样法的孤岛运行微电网可靠性评估 (Short-term reliability evaluation of islanded microgrid based on system short-term sequential transition sampling) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 66-74.
- [16] 林威, 靳小龙, 穆云飞, 等 (Lin Wei, Jin Xiaolong, Mu Yunfei, et al.). 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法 (Multi-objective optimal hybrid power flow algorithm for integrated local area energy system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (20): 5829-5839.
- [17] 胡泉, 尚策, 程浩忠, 等 (Hu Xiao, Shang Ce, Cheng Haozhong, et al.). 综合能源系统能流计算方法述评与展望 (Review and prospect of energy flow calculation method in comprehensive energy system) [J/OL]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems). DOI: 10. 7500/AEPS20191113001.
- [18] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等 (Wang Yingrui, Zeng Bo, Guo Jing, et al.). 电-热-气综合能源系统多能流计算方法 (Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (10): 2942-2950.
- [19] 郭祚刚, 雷金勇, 马溪原, 等 (Guo Zuogang, Lei Jinyong, Ma Xiyuan, et al.). 大规模综合能源系统电-气-热多能潮流建模与计算方法 (Modeling and calculation methods for multi-energy flows in large-scale integrated energy system containing electricity, gas, and heat) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSSA), 2019, 31 (10): 96-102.
- [20] 吕勃蓬, 李晓平 (Lv Bopeng, Li Xiaoping). 天然气管网稳态分析方法研究现状与展望 (Research status and prospect of steady state analysis methods of natural gas pipeline network) [J]. 油气田地面工程 (Oil and Gas Field Surface Engineering), 2012, 31 (11): 20-22.
- [21] 陆庆乐, 王锦森 (Lu Qingyue, Wang Jinsen). 复变函数 (Complex function) [M]. 北京: 高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 2011.
- [22] Dong W, Yang X. Complex function approximation using two-dimensional interpolation [J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 62 (12): 2948-2960.
- [23] Pradeep S, Rajive T. STATCOM model using holomorphic embedding [J]. IEEE Access, 2019, 7: 33075-33086.
- [24] Rao S, Yang F, Daniel J, et al. The holomorphic embedding method applied to the power-flow problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31 (5): 3816-3828.
- [25] Trias A, Marín J L. The holomorphic embedding load flow method for DC power systems and nonlinear DC circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2016, 63 (2): 322-333.
- [26] Stahl H. Extremal domains associated with an analytic function I, II [J]. Complex Variables and Elliptic Equations, 1985, 4 (4): 311-338.
- [27] Stahl H. On the convergence of generalized Padé approximants [J]. Constructive Approximation, 1989, 5: 221-240.

附录

附表1 电力网络负荷节点数据

Appl.Tab.1 Power network load node parameters

节点	负荷		节点	负荷	
	有功/(pu)	无功/(pu)		有功/(pu)	无功/(pu)
1	0	0	10	0.09	0.033 4
2	0.12	0.043 4	11	0.015	0.004 4
3	0.061 3	0.021 4	12	0.030 3	0.010 4
4	0.152	0.052 4	13	0	0
5	0.10	0.043 4	14	0.070 3	0.020 4
6	0	0	15	0.121 3	0.040 4
7	0.081 3	0.023 4	16	0.130 3	0.058 4
8	0	0	17	0	0
9	0	0	—	—	—

附表2 电力网络线路参数

Appl.Tab.2 Power network line parameters

线路	阻抗/(pu)	线路	阻抗/(pu)
1-2	0.110 7+j0.002 82	9-10	0.009 94+j0.002 905
2-3	0.009 94+j0.002 905	10-11	0.017 395+j0.003 01
2-4	0.009 94+j0.002 905	10-12	0.009 94+j0.002 905
3-5	0.009 94+j0.002 905	10-13	0.041 4+j0.002 46
4-6	0.041 4+j0.002 46	11-14	0.017 395+j0.003 01
5-7	0.009 94+j0.002 905	12-15	0.110 7+j0.002 82
7-8	0.026 13+j0.002 43	14-16	0.017 395+j0.003 01
7-9	0.009 94+j0.002 905	16-17	0.017 522+j0.088 2

附表3 天然气网络参数

Appl.Tab.3 Natural gas network parameters

节点	负荷/(m <sup>3</sup> /h)	压力/bar	管道	直径/mm	长度/m
1	0	80	1-2	600	1 500
2	-	0	2-3	400	900
3	110	0	2-4	400	3 000
4	-	0	4-5	400	1 000
5	-	0	4-6	400	2 000
6	-	0	6-7	400	1 800
7	-	0	6-8	400	2 200
8	100	0	8-9	400	2 800
9	-	0	—	—	—

附表4 不同方法下天然气网络能流计算结果

Appl.Tab.4 EF calculation results of natural gas network under different methods

管道	差异化求解方法(法一)		N-R分解算法(法二)	
	流量/(m <sup>3</sup> /h)	压降/bar	流量/(m <sup>3</sup> /h)	压降/bar
1-2	2 467.130 854	199.510 186	2 467.352 896	200.786 247
2-3	110	1.959 448	110	2.600 643
2-4	2 023.797 520	1 824.178 187	2 023.990 125	1 824.929 397
4-5	250.618 192	9.489 758	250.593 730	9.489 758
4-6	1 295.474 764	492.700 854	1 295.215 669	491.204 233
6-7	417.696 986	57.283 085	417.730 402	57.166 530
6-8	655.555 556	171.671 323	655.621 116	171.705 225
8-9	555.555 556	154.877 774	555.555 556	155.027 133
计算用时 /s	0.015 283		0.023 164	

附表5 不同方法下电力节点电压计算结果

Appl.Tab.5 Calculation results of power node voltage under different methods

节点	差异化求解方法(法一)		N-R分解算法(法二)	
	幅值/(pu)	相角/rad	幅值/(pu)	相角/rad
1	1.02	0	1.02	0
2	1.005 752	-0.023 949	1.005 761	-0.024 048
3	1.004 836	-0.026 508	1.004 844	-0.026 617
4	1.007 307	-0.024 003	1.007 319	-0.024 099
5	1.004 594	-0.029 104	1.004 603	-0.029 223
6	1.019 704	-0.027 328	1.019 734	-0.027 411
7	1.005 472	-0.031 838	-0.031 838	-0.031 967
8	1.009 977	-0.038 496	-0.038 496	-0.038 648
9	1.004 980	-0.032 311	-0.032 311	-0.032 441
10	1.004 489	-0.032 785	-0.032 785	-0.032 915
11	1.004 249	-0.033 101	-0.033 101	-0.033 232
12	1.002 825	-0.032 725	-0.032 725	-0.032 856
13	1.014 898	-0.036 248	-0.036 248	-0.036 373
14	1.004 281	-0.033 449	-0.033 449	-0.033 580
15	0.989 155	-0.028 570	-0.028 570	-0.028 692
16	1.005 589	-0.033 939	-0.033 939	-0.034 070
17	1.017 518	-0.018 415	-0.018 415	-0.018 513
计算用时 /s	0.024 338		0.066 259	

附表6 电力网络节点电压计算结果

Appl.Tab.6 Power network node voltage calculation results

节点	幅值/(pu)	相角/rad	节点	幅值/(pu)	相角/rad
1	0.985 737	-0.014 796	10	0.986 479	-0.01 4933
2	0.985 737	-0.014 796	11	0.986 234	-0.015 259
3	0.985 487	-0.014 827	12	0.984 780	-0.014 872
4	0.987 325	-0.014 851	13	0.997 603	-0.016 287
5	0.985 919	-0.014 894	14	0.986 266	-0.015 618
6	0.999 985	-0.018 296	15	0.970 822	-0.010 552
7	0.987 487	-0.015 105	16	0.987 601	-0.01 6123
8	0.994 710	-0.017 263	17	0.999 740	0
9	0.986 983	-0.015 019	-	-	-

附表7 天然气网络能流计算结果

Appl.Tab.7 EF calculation results of natural gas network

管道	流量/(m <sup>3</sup> /h)	压降/bar
1-2	2 733.733 948	237.696 306
2-3	110	1.953 405
2-4	2 290.400 615	2 207.789 021
4-5	443.119 292	28.166 261
4-6	1 320.897 070	85.083 252
6-7	443.119 292	64.449 881
6-8	655.555 556	171.674 323
8-9	555.555 556	154.877 774

## Differentiated solution for energy flow of electric-gas multi-energy microgrid

PENG Han-mei, LIU Jian-feng, LI Cai-bao, SU Yong-xin, TAN Mao

(College of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** Multi-energy interconnection on the distribution network/user side can be realized by multi-energy microgrid, which is an important entry point for achieving energy utilization improvement and efficiency improvement. Aiming at the diversity of EH operation modes in the multi-energy microgrid and the energy flow characteristics difference of the power network and the natural gas network, an energy flow differentiated solution method for electric-gas multi-energy microgrid is developed in this paper. It solves the power network and natural gas network based on decoupling, and recursively solves the energy flow of the power network based on the analytical function, and uses the linear approximation method to solve the energy flow of the natural gas network. The node types of EH are processed and its energy flow calculation model is established. When solving the power network, the analytical function equation of the power node is constructed, and the analytic function of the unknown variable as a power series is expressed, and the finite term power series coefficients is recursively solved, then the Padé approximation of the finite term power series are constructed to judge the feasibility of the solution. Finally, correctness and effectiveness of the proposed method are verified with the energy flow calculation of electricity-gas multi-energy microgrid example system.

**Key words:** multi-energy microgrid; energy flow calculation; differentiated solution; analytic function; recursive solution