# 含冷热电三联供的微能源网能量流计算及综合仿真

马腾飞,吴俊勇,郝亮亮

(北京交通大学电气工程学院,北京市 100044)

摘要:首先给出了微能源网的定义,然后基于能源集线器的概念,建立了冷热电三联供(CCHP)系统的能量流模型;并将其作为配电网与天然气网的耦合节点,推导了适用于天然气网能量流计算的 有限元节点法,提出了一种电-气耦合微能源网的能量流计算方法。提出了 CCHP 供能率的指标。 以 openDSS 和 MATLAB 为平台,对含 CCHP 的微能源网进行综合仿真,分别计算了以电定热和 以热定电两种典型运行方式下夏季典型日的逐时能量流。计算结果表明,所提出的能量流计算和 综合仿真方法可用于分析微能源网的能量流,CCHP 供能率指标可以反映微能源网电-气能源的 耦合程度。

关键词:能源互联网;微能源网;能源集线器;天然气网;有限元节点法;能量流;openDSS;供能率

# 0 引言

全球能源安全、环境污染等问题迫使人们改变 现有能源消费模式,电、气、热等多种形式能源的综 合利用对于提高能源利用效率、降低能源利用成本 有重要意义[1]。文献[2]提出了"能源互联网"的概 念,为多能源系统的理论体系分析提供了新思路。 能源互联网中,能源供应呈现多样性,不同能源形式 之间相互耦合,为用户提供冷、热、电、气等多种形式 的能源。构建由电、热、气等不同形式能源在生产、 传输、消费等多个环节进行协同优化,多能互补的综 合能源系统是能源互联网发展的必经之路[3]。多种 形式能源之间相互耦合的研究对于安全用能、提高 能源利用效率具有重要意义。目前电力系统和天然 气网络相互耦合组成的微能源网是最常见的能源耦 合形式之一,研究该类微能源网的能量流计算问题 是分析其稳定性、可靠性的基础。对此国内外学者 已经展开研究,并取得了一些成果。

目前对于电力-天然气网络组成的微能源网能 量流的求解方法主要分为统一求解法和分解求解法 两类。统一求解法即建立电力-天然气混联系统的 混合潮流方程,运用牛顿-拉夫逊等数值解法进行 统一求解。分解求解法是在考虑两系统耦合因素的 基础上将电力潮流和天然气系统潮流分别求解。文 献[4]将电力潮流的概念推广到电-气互联能源系 统,采用牛顿迭代法计算分析了其最优潮流问题。 文献[5-6]考虑了电力和天然气网络之间燃气轮机 的耦合,计算分析了电-气混合系统的能量流。文 献[7]研究了电力和天然气混合网络的最优潮流计 算。文献[8-9]在统一框架下建立了电力天然气混 合系统的潮流方程,探究了耦合系统的潮流算法。 文献[10]运用牛顿-拉夫逊法建立了电-气混联综 合能源系统的稳态潮流求解模型,并分析了其概率 能量流。文献[11]以电-气互联系统的总运行成本 为优化目标探究了互联系统的概率最优潮流问题。

然而,文献[4-11]均采用统一求解法将不同能 量流的方程列在一起作为整体运用牛顿-拉夫逊法 求解,计算工作量大,计算速度慢,而且不同能量流 系统的数值差异大,在求取雅可比矩阵时可能出现 不可逆的情况,导致方法失效。文献[12]考虑不同 耦合形式和能源供应模式下电力网络和燃气管网的 相关约束,给出了区域综合能源系统的完全解耦、部 分耦合以及完全耦合3种运行模式,虽然探究了混 合潮流算法,然而计算量大,迭代次数比较多,耦合 紧密时收敛性难以保证。此外,现有文献大多基于 单一时间断面进行能量流计算,当耦合单元的负荷 变化时,系统能量流会相应地发生变化,现有计算仿 真方法无法快速准确地对微能源网的能量流进行多 时间断面计算,甚至实时仿真。

本文采用分解求解法,以能源集线器作为电力 系统与天然气系统的耦合环节,充分利用 openDSS

收稿日期:2016-04-26;修回日期:2016-08-03。

上网日期:2016-10-17。

国家电网公司科技项目(SGTYHT/15-JS-191)。

在潮流分析方面具有多种分析计算模式(日潮流、年 潮流、短期潮流)及求解速度快等优点,以 openDSS 和 MATLAB 为平台进行联合仿真,提出一种电一气 耦合的微能源网能量流计算方法,实现了多时间断 面稳态能量流的快速求解。此外提出冷热电三联供 (CCHP)供能率的指标,用于评估微能源网中电网 和气网的耦合程度。

# 1 微能源网概念和能源集线器模型介绍

#### 1.1 微能源网的概念

微能源网是一种微型综合能源互联系统,是能 源互联网的重要组成部分。微能源网通过电力网、 天然气网、热力网、氢气网、交通网等系统互联,通过 优化设计和协调运行,实现多能互补和替代用能,因 地制宜,充分利用当地的光伏、风电、地热等可再生 能源,满足终端用户的冷、热、电、气等多种能源需 求,降低用户的综合用能成本,提高能源的利用效 率,降低污染物排放,最终实现安全、可靠、清洁、高 效、环境友好和可持续发展的微型综合能源互联系 统。

#### 1.2 能源集线器

能源集线器是由瑞士苏黎世联邦理工学院的 Anderson教授提出的模型<sup>[13]</sup>,该模型将用能需求 抽象为冷、热、电三类,可用于描述多能源系统中能 源、负荷、网络之间的交换、耦合关系。基于能源集 线器概念提出了一个含有微燃机、吸收式制冷机、锅 炉等设备的 CCHP 系统,参见附录 A 图 A1。微燃 机消耗天然气发电,为居民区提供电能,不足部分由 电网供给。微燃机产生的余热一部分用于供热,另 一部分进入溴化锂吸收式制冷机为居民区供冷,余 热不足部分由锅炉补充。其能源转换关系描述如 下。

#### 1.3 微燃机模型

微燃机产生的热量与输出电功率之间的关系 为:

$$Q_{\rm MT}(t) = \frac{P_{\rm e}(t)(1 - \eta_{\rm e} - \eta_{\rm l})}{\eta_{\rm e}}$$
(1)

式中: $Q_{MT}(t)$ 为 t 时刻的微燃机排气余热量; $P_{e}(t)$ 为 t 时刻微燃机的输出电功率; $\eta_{e}$ 为微燃机的发电效率,取 0.3; $\eta_{1}$ 为微燃机的热损失系数,取 2%。

微燃机消耗的天然气量可表示为:

$$V_{\rm MT}(t) = \frac{P_{\rm e}(t)\Delta t}{\eta_{\rm e}L_{\rm NG}}$$
(2)

式中: $V_{MT}(t)$ 为t时刻微燃机消耗的天然气量; $L_{NG}$ 为天然气的低位热值,取 9.78(kW•h)/m<sup>3</sup>; $\Delta t$ 为时间步长,取 1 h。

#### 1.4 锅炉模型

燃气锅炉供热量与额定供热量之间的关系式 为:

$$Q_{\rm GB} = R_{\rm GB} \eta_{\rm GB} \tag{3}$$

式中: $Q_{GB}$ 为锅炉的输出热量值; $R_{GB}$ 为锅炉的额定 供热量; $\eta_{CB}$ 为锅炉的热效率,取 0.9。

锅炉消耗天然气量可表示为:

$$V_{\rm GB}(t) = \frac{Q_{\rm GB}(t)\Delta t}{\eta_{\rm CB}L_{\rm NG}}$$
(4)

式中: $V_{GB}(t)$ 为锅炉 t 时刻消耗的天然气量; $Q_{GB}(t)$ 为锅炉 t 时刻的输出热量值。

#### 1.5 溴化锂制冷机模型

烟气型溴化锂制冷机是利用燃气发电机组产生 出来的高温烟气做功推动制冷机工作,将烟气内所 含能量转换为制冷量。其单位时间制冷量可表示 为:

$$R_{a}(t) = Q_{i}(t)C_{OP}$$
(5)

式中: $C_{\text{OP}}$ 为溴化锂制冷机制冷系数,取 1.38; $R_{a}(t)$ 为 t 时刻制冷量; $Q_{i}(t)$ 为 t 时刻加热源热量。

# 1.6 系统运行约束条件

*t* 时刻微燃机发电功率、锅炉供热量及吸收式 制冷机制冷量受到其额定容量限制:

$$P_{\rm e}(t) \leqslant P_{\rm en} \tag{6}$$

$$Q_{\rm gb}(t) \leqslant Q_{\rm gen} \tag{7}$$

$$R_{a}(t) \leqslant R_{an} \tag{8}$$

式中: $P_{en}$ 为微燃机 t 时刻额定功率; $Q_{gen}$ 为锅炉 t 时 刻额定供热量; $R_{an}$ 为吸收式制冷机 t 时刻额定制冷 量。

此外系统在 t 时刻满足电、热、冷能量平衡:

$$P_{\rm e}(t) + P_{\rm grid}(t) = E_{\rm d}(t) \tag{9}$$

$$Q_{\rm MT}(t) + Q_{\rm GB}(t) = Q_{\rm d}(t) + Q_{\rm i}(t)$$
 (10)

$$R_{a}(t) = R_{d}(t) \tag{11}$$

式中: $P_{grid}(t)$ 为 t 时刻电网的供电功率; $E_{d}(t)$ 为 t 时刻的电负荷; $Q_{d}(t)$ 为 t 时刻的热负荷,由微燃机 和锅炉供热; $R_{d}(t)$ 为 t 时刻的冷负荷,由吸收式制 冷机供冷。

#### 2 微能源网能量流稳态计算模型

#### 2.1 天然气管网稳态计算模型

目前在燃气管网能量流计算中常用的方法有节 点法、管段法和环能法3种<sup>[14]</sup>。其中节点法又分为 牛顿-拉夫逊法和有限元节点法。牛顿-拉夫逊法 对于初值的选取比较苛刻,而有限元节点法采用一 般迭代法,可以在较大范围内选取初值<sup>[15]</sup>,本文采 用有限元节点法将非线性方程组线性化来求解。

采用有向图表示天然气管网的拓扑结构,支路

表示管道。支路方向表示天然气流向,若与实际流向相同则为正值,相反则为负值。支路与节点的关 联性质可以用关联矩阵描述。支路一节点关联矩阵 A的元素 a<sub>i,j</sub> (*i*=1,2,…,*n*,*j*=1,2,…,*m*,其中,*n* 为节点数,*m* 为管道数)定义如下:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 0 & 支路 j 与节点 i 无关联 \\ 1 & 支路 j 与节点 i 关联且方向流入节点 \\ 1 & 支路 j 与节点 i 关联且方向流出节点 \\ 1 & (12) \end{cases}$$

将关联矩阵 A 中参考节点所在行划去,则为降 阶关联矩阵。根据基尔霍夫定律<sup>[16]</sup>,天然气管网满 足以下特性<sup>[17]</sup>。

1)节点方程

由基尔霍夫第一定律,任何一个节点的流量代数和为零。这就是说在任何节点的负荷等于流入、 流出该节点支路流量之和,用矩阵形式表示为:

$$AQ = q \tag{13}$$

式中:q为天然气管网中燃气负荷向量;Q为支路流量向量。

2)回路方程

由基尔霍夫第二定律,沿着任何一个闭合回路 的压力降为零。一个闭合回路的起点和终点是同一 点,因此沿着整个回路的压力降为零,用矩阵可表示 为:

$$\boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{P} = \boldsymbol{0} \tag{14}$$

式中:**B** 为回路关联矩阵;Δ**P** 为管道压降向量,其 元素可以由该管道起点和终点的压强差求得。

将关联矩阵 A 转置,再乘上节点相对压强的列 向量即等于各管道的压强降,即

$$\Delta \boldsymbol{P} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \tag{15}$$

式中:P 为相对于参考节点的压强。

#### 2.2 有限元节点法数学模型推导

根据《城镇燃气设计规范(2002版)》<sup>[16]</sup>,高中压 燃气管道压降基本计算公式为:

$$P_1^2 - P_2^2 = 1.27 \times 10^{10} \lambda \frac{Q^2}{d^5} \rho_0 \frac{T}{T_0} L$$
 (16)

式中: $P_1$ 为管道始端压强; $P_2$ 为管道末端压强; $\lambda$ 为 燃气管道摩擦阻力系数;d为管道内径; $\rho_0$ 为燃气 密度;T为燃气绝对温度; $T_0$ 为标准状态绝对温度, 即 273.6 K;L为燃气管道的计算长度。

低压管道压降基本计算公式为:

$$\boldsymbol{P}_{1} - \boldsymbol{P}_{2} = 6.26 \times 10^{7} \lambda \, \frac{\boldsymbol{Q}^{2}}{\boldsymbol{d}^{5}} \boldsymbol{\rho}_{0} \, \frac{\boldsymbol{T}}{\boldsymbol{T}_{0}} \boldsymbol{L} \qquad (17)$$

令管道的阻抗 S 的表达式为式(18),它是一个 与管网的物理特性、管道的流体种类,以及流体流动 状态有关系的常量,则管道流量与压降关系可以表 示为如式(19)所示。

$$\boldsymbol{S} = \begin{cases} 6.26 \times 10^7 \, \frac{\lambda}{\boldsymbol{d}^5} \rho_0 \, \frac{\boldsymbol{T}}{\boldsymbol{T}_0} \boldsymbol{L} & \quad \textbf{K E 管 } \boldsymbol{i} \\ 1.27 \times 10^{10} \frac{\lambda}{\boldsymbol{d}^5} \rho_0 \, \frac{\boldsymbol{T}}{\boldsymbol{T}_0} \boldsymbol{L} & \quad \boldsymbol{\bar{\boldsymbol{\beta}}} \boldsymbol{\boldsymbol{\theta}} \boldsymbol{\boldsymbol{\theta}} \boldsymbol{\boldsymbol{\Xi}} \end{cases}$$
(18)

$$\Delta \boldsymbol{P} = \boldsymbol{S} \boldsymbol{Q}^2 \tag{19}$$

此处对于低压管道有  $\Delta P = P_1 - P_2$ ,对于高中 压管道有  $\Delta P = P_1^2 - P_2^2$ 。

设S'=SQ,则

$$\Delta \boldsymbol{P} = \boldsymbol{S}' \boldsymbol{Q} \tag{20}$$

$$\Leftrightarrow \boldsymbol{G} = 1/\boldsymbol{S}', \boldsymbol{M}$$

$$\boldsymbol{O} = \boldsymbol{G} \Delta \boldsymbol{P} \tag{21}$$

可得关于未知量 P 的线性方程为:

$$AGA^{\mathrm{T}}P = q \qquad (22)$$

令
$$Y = AGA^{T}$$
,上式可写为:

$$\boldsymbol{YP} = \boldsymbol{q} \tag{23}$$

这样就将管道压降和流量关系式线性化,Y称为迭代矩阵,G称为导纳矩阵。式(23)即为有限元节点法的迭代数学模型。基于有限元节点法的天然 气网络能量流计算流程图见附录 A 图 A2。

#### 2.3 微能源网能量流计算方法

基于上文提出的 CCHP 系统的能量流模型,微能源网能量流求解问题可描述为:

$$\begin{cases} f_{e}(P,Q,V,\theta) = \mathbf{0} \\ f_{g}(\pi,l) = \mathbf{0} \\ f_{eh}(p,g) = \mathbf{0} \end{cases}$$
(24)

式中: $f_{e}$ , $f_{h}$ , $f_{eh}$ 分别表示电力系统方程、天然气系 统方程和能源集线器能量流方程;P,Q,V, $\theta$ 分别 为电气节点有功功率、无功功率、电压幅值和相角;  $\pi$ 和l分别为天然气系统节点压强和流量;p和g分别为能源集线器与配电网和天然气网交换的电功 率和天然气。

CCHP有两种典型的运行方式:以电定热和以 热定电,即系统分别优先满足用户电需求和热需求 来运行<sup>[18]</sup>。以电定热运行方式优先满足居民区电 负荷,不足的热量由锅炉燃烧天然气提供。以热定 电运行方式优先满足居民区冷热负荷,不足的电力 由配电网系统提供。求解微能源网能量流首先根据 CCHP的运行方式,由能量流模型求解出它与外网 交换的能量 p 和g,然后将其电气接口作为有功功 率-无功功率节点接入配电网,将其燃气接口作为 恒定负荷节点接入天然气网,应用上文介绍的分解 求解法求得微能源网的能量流。

## 2.4 微能源网能量流综合仿真

openDSS<sup>[19]</sup>是美国电力科学研究院(EPRI)针 对配电网特点开发的开源软件,该软件可以进行潮 流分析、谐波分析、动态分析以及故障分析等。其中,openDSS为潮流分析提供了多种计算模式,有日潮流分析、年潮流分析、短期潮流分析等,并提供了高斯迭代算法和牛顿迭代算法两种基本迭代潮流求解算法。此外 openDSS 在处理配电网的三相不平衡线路、不平衡负荷、配电变压器、电容器(组)、电压调节器上也具有独特的优越性。openDSS 还提供了与其他编程软件的组件对象模型接口,如MATLAB,VBA,Delphi,Python<sup>[19]</sup>。

本文通过组件对象模型接口连接 MATLAB 和 openDSS 进行综合仿真,提出了一种微能源网能量 流计算方法,在 MATLAB 中基于上文介绍的有限 元节点法编程实现天然气网的能量流计算并通过组 件对象模型接口驱动 openDSS 在日潮流模式下计 算配电网 24 h 的逐时潮流以及实现两个系统间耦 合节点的信息交互。综合仿真架构参见附录 A 图 A3。

# 3 算例分析

## 3.1 算例介绍

本文所用的微能源网联合仿真算例架构如图 1 所示。它由 IEEE 37 节点配电系统、8 节点天然气 网和两个能源集线器组成。其中能源集线器 1 分别 与配电网节点 742 和天然气网节点 2 相连,能源集 线器 2 则分别与配电网节点 732 和天然气网节点 6 相连。配电网和天然气网通过能源集线器进行耦 合,配电网和天然气网分别为能源集线器供电、供 气,通过能源集线器为居民区提供所需的冷、热、电 能源。



图 1 微能源网架构 Fig.1 Architecture of micro energy grid

天然气网包含 11 条输气管道、8 个节点(节点 8 为气源点,即参考点),管道支路参数及节点气负荷 分别见附录 A 表 A1 和表 A2。IEEE 37 节点配电 系统参数可参考文献[20],并分别在节点 703,718, 731 和 741 接入光伏和储能。假设两个能源集线器 配置相同,微燃机额定功率为 600 kW,锅炉额定供 热量为 100 kW,制冷机额定制冷量为 2 200 kW。

# 3.2 运行方式分析

假设两个居民区夏季典型日负荷曲线相同,参见附录 A 图 A4。CCHP 系统运行在以电定热和以 热定电两种典型运行方式时,天然气网和配电网为 能源集线器提供的能源计算结果分别见附录 A 图 A5 和图 A6。运用上文介绍的 MATLAB 和 openDSS 综合仿真平台分别计算微能源网在这两 种典型运行方式下的能量流,得出了配电网各节点 电压、线路功率和天然气网各节点压强、支路流量在 夏季典型日 24 h 的逐时变化情况。

此处仅给出了配电网主馈线各节点的三相电压和天然气网各节点压强逐时变化计算结果。其中, 以电定热运行方式下 A 相逐时电压如图 2 所示。 B,C 相逐时电压见附录 A 图 A7 和图 A8。天然气 网络各节点逐时气压如图 3 所示。



图 2 A 相逐时电压 Fig.2 Hourly voltage of phase A



为便于比较,给出了以热定电运行方式下配电 网主馈线各节点的三相电压和天然气网各节点压强 逐时变化计算结果,其中 A,B,C 相逐时电压见附 录 A 图 A9 至图 A11。天然气网络各节点逐时气 压见附录 A 图 A12。

由以上计算结果可知,CCHP运行模式不同,配 电网各相电压幅值不同,天然气网节点气压也不相 同,实际运行当中应充分考虑运行模式对系统的影 响。由于 IEEE 37 节点系统存在三相不平衡负荷, 故 A,B,C 相电压幅值不同,本文综合仿真平台实现 了微能源网多时间断面的能量流计算,能够较好地 分析 三相不平衡负荷等对系统的影响。基于 openDSS 多种潮流计算模式,通过设置仿真时间步 长可实现微能源网稳态能量流的实时计算。

#### 3.3 CCHP供能率对系统的影响

类比功率渗透率的概念(额定装机功率与峰值 负荷功率的比值),提出 CCHP 供能率的概念,亦可 称作 CCHP 渗透率。它可以表示为 CCHP 系统中 微燃机、锅炉和制冷机总额定装机容量与单位时间 内冷热电总需求量峰值之比。用数学表达式可表示 为:

$$S_{\rm CCHP} = \frac{C_{\rm CHP}}{D_{\rm CHP}} = \frac{C_{\rm MT} + C_{\rm GB} + C_{\rm AR}}{D_{\rm C} + D_{\rm H} + D_{\rm P}}$$
(25)

式中:S<sub>CCHP</sub>为 CCHP 供能率;C<sub>CHP</sub>为 CCHP 系统微 燃机、锅炉和制冷机总额定装机容量;D<sub>CHP</sub>为单位 时间内冷热电总需求量;C<sub>MT</sub>,C<sub>GB</sub>,C<sub>AR</sub>分别为微燃 机、锅炉和制冷机额定容量;D<sub>C</sub>,D<sub>H</sub>,D<sub>P</sub>分别为单 位时间内冷、热、电需求量。

由 CCHP 供能率定义可知, S<sub>CCHP</sub> 取值 100%时 表明 CCHP 系统本身能完全满足负荷能量需求, 取 值为 0 时则为不含 CCHP 系统情况, 取值处于 0~ 100%之间时则表明 CCHP 系统仅能满足部分负荷 能量需求。

下面仅以微能源网算例中配电网主馈线节点的 A 相电压及天然气网各节点气压变化为例,分别探 究系统在以电定热和以热定电两种典型工作模式 下,CCHP供能率对其影响。由附录 A 图 A3 可知, 13 h 时冷热电需求总量最大,为使问题具有代表 性,选取该时刻作为时间断面进行研究。在以电定 热运行方式下,CCHP供能率对配电网主馈线各节 点 A 相电压的影响及对天然气网节点气压的影响 分别如图 4 和图 5 所示。以热定电运行方式下, CCHP供能率对配电网主馈线各节点 A 相电压的 影响及对天然气网节点气压的影响分别见附录 A 图 A13 和图 A14。

可见,两种工作方式下,配电网节点电压及天然 气网节点气压随 CCHP 供能率的变化规律类似, 图 4 和附录 A 图 A13 表明,随着 CCHP 供能率降低,配电网节点电压降低;由式(25)可知,CCHP 供 能率越小,即 CCHP 系统额定装机容量越小,实际 为负荷提供的能量越少,为满足负荷能量需求,负荷 耗电量越大,即配电网的供电量越大。图 5 和附 录 A 图A14 则表明,随着 CCHP 供能率降低,天然 气网节点气压则增大。这是由于 CCHP 供能率越 小,即 CCHP 系统额定装机容量越小,受系统额定 装机容量限制,消耗的天然气量越小,故天然气网的 供气量越小。



图 4 CCHP 供能率对配电网节点 A 相电压影响 Fig.4 Influence of CCHP energy supply rate on phase A voltage of distribution network



图 5 CCHP 供能率对天然气网节点气压影响 Fig.5 Influence of CCHP energy supply rate on pressure of natural gas network

综上分析,CCHP供能率大小在一定程度上反映了配电网和天然气网的耦合程度,CCHP供能率越小,配电网供电量越大,天然气网供气量越小,反之CCHP供能率越大,配电网供电量越小,天然气网供气量越大。CCHP供能率大小影响配电网电压水平和天然气网各节点气压水平,不同负荷水平影响程度不同,当电压、气压越限时需要采取必要措施以保障电能质量以及气压水平。

# 4 结语

微能源网研究中,需要一种快速有效的方法和 仿真平台对多时间断面的能量流进行计算分析。本 文首先给出了微能源网的定义,然后基于能源集线 器概念,构建了包含微燃机、锅炉、吸收式制冷机的 CCHP系统,推导了适用于天然气网潮流计算的有 限元节点法。在此基础上给出一种以能源集线器为 耦合节点的微能源网架构,提出一种微能源网能量 流计算方法,并首次将 openDSS 和 MATLAB 联合 用于微能源网能量流综合仿真,通过算例验证了能 量流计算及综合仿真方法适用于分析微能源网的多 时间断面的稳态能量流。所提出的 CCHP 供能率 指标,可以在一定程度上反映配电网和天然气网的 耦合程度。

本文侧重于微能源网能量流计算方法、综合仿 真以及 CCHP 供能率对系统影响的研究,未来将进 一步研究包含多种分布式电源、电动汽车、储能的微 能源网能量流计算以及在此基础上进行系统的优化 设计和优化运行研究。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

# 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.DOI:10.7500/ AEPS20141009011.

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. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.

- [2] RIFKIN J. The third industrial revolution [J]. Engineering & Technology, 2008, 3(7): 26-27.
- [3] 王毅,张宁,康重庆.能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行 研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2015,35(22): 5669-5681.

WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.

- [4] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow [C]// IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas, Texas, USA: 138-143.
- [5] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. Integrated energy flow analysis in natural gas and electricity coupled systems [C]// North American Power Symposium, August 4-6, 2011, Boston, MA, USA: 7p.
- [6] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [7] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [8] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 155-159.
- [9] UNSIHUAY C, LIMA J W M, DE SOUZA A C Z. Modeling

the integrated natural gas and electricity optimal power flow [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: 7p.

- [10] 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):6331-6339.
  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): 6331-6339.
- [11] 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.DOI: 10.7500/AEPS20150611006.
  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. DOI: 10.7500/AEPS20150611006.
- [12] 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.

- [13] GEIDL M, KOEPPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [14] 杜以臣.以水力计算为基础的城市燃气管网可靠性评价[D].哈 尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [15] 张文慧.燃气管网水力计算的数学建模与算法设计[D].大连: 大连理工大学,2005.
- [16] OSIADACZ A J. Simulation and analysis of gas network[M]. Houston, USA: Gulf Publishing Company, 1987.
- [17] 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.
- [18] 覃健.微网冷热电联供系统经济性优化研究[D].北京:华北电力大学,2014.
- [19] DUGAN R C. Reference guide: the open distribution system simulator (openDSS)[R]. 2009.
- [20] KERSTING W H. Radial distribution test feeders[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 975-985.

马腾飞(1988—),男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:能源互联网、需求侧响应。E-mail: 15117386@bjtu. edu.cn

吴俊勇(1966—),男,教授,博士生导师,主要研究方向: 电力系统分析与控制、新能源发电和智能电网。E-mail: wujy@bjtu.edu.cn

郝亮亮(1985—),男,副教授,主要研究方向:电力系统 分析与控制、智能电网。E-mail: llhao@bjtu.edu.cn

(编辑 万志超)

(下转第 124 页 continued on page 124)

# Energy Flow Calculation and Integrated Simulation of Micro-energy Grid with Combined Cooling, Heating and Power

MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Firstly, the concept of micro-energy grid is introduced, and the energy flow model of combined cooling, heating and power (CCHP) system is proposed based on the concept of energy hub. The CCHP will act the role of the coupled nodes between distributed network and natural gas network. Then the finite element node method for the calculation of natural gas network energy flow is deducted. Besides, based on the software of openDSS and MATLAB, a novel method and integrated simulation platform of electricity and gas coupled energy internet is proposed. In order to assess the coupled degree of the distributed network and natural gas network, a novel index named CCHP energy supply rate is introduced. Case studies are taken with two typical operation models on a typical summer day: following the thermal load and following the electric load. Simulation results show that the method and integrated simulation platform are available and the CCHP energy supply rate index can be used to assess the coupled degree of electric-gas energy for micro-energy grid.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/15-JS-191).

Key words: energy internet; micro-energy grid; energy hub; natural gas network; finite element node method; energy flow; openDSS; energy supply rate