

基于功率守恒原理的电热联合系统潮流计算方法

孙宏宇^{1,2}, 张沛超^{1,2}, 杜 炜³, 刘学智^{1,2}, 何国鑫³

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:潮流计算是对电热联合系统进行稳态分析的基础, 热电联供机组等耦合元件引起的多能流耦合使得联合潮流计算复杂化。现有联合潮流计算方法中, 整体法存在计算效率不高和病态雅可比矩阵的问题, 而对分解法的相关研究缺乏收敛性质的分析和应对迭代发散的解决方案。为改进上述问题, 针对耦合元件存在于热电平衡节点的联合系统, 基于功率守恒原理推导了使用分解法时热网和电网平衡节点功率的迭代式, 据此分析了分解法的收敛性质, 并指出了迭代式的不动点即为平衡节点功率的解析解, 进而提出了一种求解联合潮流的新方法。最后, 通过设计电热联合系统算例证明了所提方法不但具有快速性与准确性, 能够解决分解法存在的发散问题, 而且可以用于热电耦合元件参数可行域估计。

关键词:电热联合系统; 潮流计算; 功率守恒原理; 不动点; 收敛性

中图分类号: TM 744; TK 01

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202008013

0 引言

综合能源系统(IES)是一种新型能源利用模式^[1-3], 其中电热联合系统^[4]是典型的综合能源系统。热电联供机组(CHP)等耦合元件使得电网和热网之间存在耦合关系, 多种能源之间可以互动与转换, 从而提高能源的综合利用效率。多能流联合潮流(以下简称联合潮流)计算是分析综合能源系统的基础, 在综合能源系统规划^[5]、稳态运行分析^[6]与评价^[7]、多能流静态安全分析^[8-9]以及状态估计与检测^[10-11]等方面都发挥了关键的作用。在联合潮流计算中, 当耦合元件存在于电热平衡节点处时^[5], 电热联合系统运行除了需满足各自网络的功率平衡之外, 还需满足网络之间的耦合关系, 这使得热网和电网潮流无法进行独立求解。如何处理这类耦合关系成为研究的难点。

解决上述问题的直接思路是采用整体法(integrated method)^[12-14], 即列写整个联合系统的等式约束方程, 并使用如牛顿-拉夫逊法进行求解。整体法的优点在于思路直观, 完整建立了联合系统的模型, 可扩展至运行优化和状态估计等高级应用。但整体法存在2个较为突出的问题: ①对于大规模联合系统, 雅可比矩阵维度较大和每次迭代均需更新数据, 计算效率不高, 且涉及多个系统, 矩阵元素数量级的差异易导致病态矩阵^[15]; ②整体法无法利用已有的成熟的潮流计算软件^[16]。与之相对应地, 分解法

(decomposed method)^[15-20]的核心思想是独立求解各子网络的潮流, 电热系统之间仅交互耦合元件的功率。相较于整体法, 分解法的优点在于不再需要计算大规模雅可比矩阵, 利用了子网络之间松耦合的特性, 计算速度较快, 同时可针对子网络的特性选用已有的成熟算法进行求解。但分解法自身也存在一定的问题, 文献[17]指出当多种耦合元件位于热电平衡节点时, 联合潮流计算需进行迭代求解。然而, 系统间的交互迭代过程并不一定收敛, 对于分解法收敛性质这一关键问题, 现有文献缺乏进一步的研究。文献[15, 18]仅考虑了热网潮流或电网潮流自身的收敛性质, 并未分析整体上的收敛性质; 文献[16, 20]虽然针对特定算例给出了联合潮流整体上的迭代次数, 但并未进行理论分析; 文献[17, 19]比较了整体法和分解法的收敛速度, 但未考虑分解法迭代可能发散的情况。

针对以上问题, 本文沿用分解法的思路, 当耦合元件存在于电热平衡节点时, 基于功率守恒原理推导平衡节点功率的迭代式, 据此研究耦合元件参数对分解法收敛性质的影响; 针对现有分解法迭代可能发散的问题, 基于不动点的思想提出新型联合潮流计算方法; 通过实际算例验证本文联合潮流计算方法在收敛性和快速性方面的优势。

1 电热联合潮流的分解计算方法

1.1 电热联合系统模型

电热联合系统模型如图1所示, 其由电力系统、热力系统以及CHP、电锅炉等耦合元件组成。

联合潮流计算中, 电网、热网节点类型和变量^[17]如表1所示。表中, P 、 Q 、 V 和 θ 分别为电网节点有

收稿日期: 2019-11-13; 修回日期: 2020-06-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905000)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFB0905000)

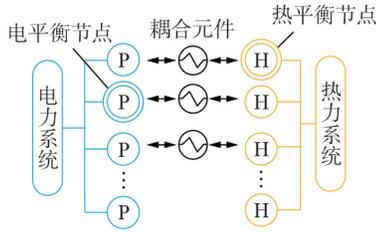


图1 电热联合系统模型

Fig.1 Model of integrated electricity and heat system

表1 电热联合系统节点类型和变量
Table 1 Node types and variables of integrated electricity and heat system

系统	节点类型	已知量	未知量
电网	平衡节点	V, θ	P, Q
	PV节点	P, V	Q, θ
	PQ节点	P, Q	V, θ
热网	平衡节点	T_s	Φ, T_r, m
	ΦT_s 节点	Φ, T_s	T_r, m
	ΦT_r 节点	Φ, T_r	T_s, m

功、无功、电压模值和相角; T_s, T_r, Φ 和 m 分别为热网节点供给温度、回水温度、热功率和管道流量。本文主要研究内容为处理电、热系统之间的耦合关系,因此不涉及单独的电网潮流和热网潮流计算方法,具体电网、热网等式约束方程和求解方法可以参考文献[4]。

1.2 耦合元件模型

CHP可以分为燃气型和蒸汽型等2类^[21],其中燃气型CHP的热电功率比 $c_{CHP,1}$ 为常数,见式(1)。

$$c_{CHP,1} = \frac{\Phi_{CHP}}{P_{CHP}} \quad (1)$$

其中, Φ_{CHP} 为CHP热功率; P_{CHP} 为CHP电功率。

而蒸汽型CHP的热电功率比 $c_{CHP,2}$ 满足:

$$c_{CHP,2} = \frac{\Phi_{CHP}}{P_{con} - P_{CHP}} \quad (2)$$

其中, P_{con} 为常数。

电锅炉仅输出热功率,其热电功率比 c_{EB} 为:

$$c_{EB} = \frac{\Phi_{EB}}{P_{EB}} \quad (3)$$

其中, Φ_{EB} 为输出热功率; P_{EB} 为输入电功率。

上述耦合元件热电功率符合线性关系^[19],下文统一使用式(2)表示其耦合关系式。

$$\Phi = cP + d \quad (4)$$

其中, c, d 为描述耦合元件关系式的系数。需要说明的是,耦合元件皆视作供能设备,向系统输出电功率或热功率。

根据耦合元件是否存在于热电平衡节点,本文将电热联合系统分为4类,如表2所示。由表2可知,1类系统最易求解,电网和热网平衡节点无耦合

元件,因此热网、电网潮流仍可独立求解;对于2、3类系统,按合适的顺序先后求解2类潮流即可^[19],此时潮流波动将全部由不存在耦合元件的平衡节点抵消;4类系统的热电耦合最为紧密,计算也最为复杂,是电热联合潮流计算的难点^[15],这类联合系统也是本文的主要研究对象。

表2 电热联合系统类型

Table 2 Types of integrated electricity and heat system

系统类型	耦合元件位置		耦合程度	潮流求解思路
	热网平衡节点	电网平衡节点		
1			低	独立求解热网、电网潮流
2	√		中	顺序求解:先求解热网潮流,再求解电网潮流
3		√	中	顺序求解:先求解电网潮流,再求解热网潮流
4	√	√	高	需交替迭代求解电网、热网潮流

1.3 分解法求解联合潮流思路

分解法的核心思想是独立求解电网、热网潮流,电热系统之间仅交换耦合元件的功率。对于表2所示的4类系统,其求解流程包含闭环迭代过程,如图2所示。

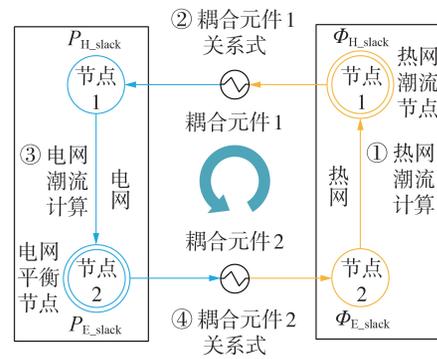


图2 分解法迭代过程

Fig.2 Iterative process of decomposed method

图2中,当耦合元件1存在于热网平衡节点1时,运行方式为以热定电, Φ_{H_slack} 为其热功率, P_{H_slack} 为其耦合的电网节点1的电功率;当耦合元件2存在于电网平衡节点2时,运行方式为以电定热, P_{E_slack} 为其电功率, Φ_{E_slack} 为其耦合的热网节点2的热功率。

对于电热联合潮流,上述4个量皆为待求量。首先设定 Φ_{E_slack} 的初值,通过步骤①以 Φ_{E_slack} 为热网潮流的边界条件可得 Φ_{H_slack} ,通过步骤②由耦合元件1关系式得到 P_{H_slack} ,通过步骤③以 P_{H_slack} 为电网潮流的边界条件可得 P_{E_slack} ,通过步骤④由耦合元件2关系式得到 $\Phi_{E_slack}^*$ 。当 $\Delta\Phi_{E_slack}$ 小于设定值 ϵ 时,电热联合潮流整体收敛,否则重复步骤①—④进行迭代。

分解法在迭代过程中既满足了独立网络的潮流,又满足了耦合元素的关系式。但对于不同的系统,利用分解法进行求解不一定收敛,或者收敛速度很慢,为此本文提出了采用功率守恒法解决上述问题。

2 功率守恒法

2.1 功率守恒原理分析方法

电网、热网的平衡节点满足以下功率守恒方程:

$$P_{E_slack} + P_{H_slack} + P_{ex} = P_{load} + P_{loss} \quad (5)$$

$$\Phi_{H_slack} + \Phi_{E_slack} + \Phi_{ex} = \Phi_{load} + \Phi_{loss} \quad (6)$$

其中, P_{load} 为电负荷总功率; P_{loss} 为电网总损耗; P_{ex} 为除电网节点 1、2 外的电源功率之和; Φ_{load} 为热负荷总功率; Φ_{loss} 为热网总损耗; Φ_{ex} 为除热网节点 1、2 外的热源功率之和。

在使用分解法求解电热联合潮流的过程中,每次迭代进行潮流计算后,实际用到的信息只有平衡节点的电、热功率。因而可用上述功率守恒方程替代潮流计算,从而推导分解法的迭代式。

下面以热网平衡节点为例,推导其热功率 Φ_{H_slack} 的数学迭代式。需说明的是,应用同样方法也可得到 P_{H_slack} 、 P_{E_slack} 、 Φ_{E_slack} 的迭代式。

(1) 设第 n 次迭代时热网节点 1 功率为 $\Phi_{H_slack}^{(n)}$ 。

(2) 根据以热定电的耦合元件 1 的关系式可得:

$$P_{H_slack}^{(n)} = \frac{1}{c_1} (\Phi_{H_slack}^{(n)} - d_1) \quad (7)$$

(3) 应用电网功率守恒方程式(5)可得:

$$P_{E_slack}^{(n)} = P_{load} + P_{loss}^{(n)} - (P_{H_slack}^{(n)} + P_{ex}) \quad (8)$$

(4) 根据以电定热的耦合元件 2 的关系式可得:

$$\Phi_{E_slack}^{(n)} = c_2 P_{E_slack}^{(n)} + d_2 \quad (9)$$

(5) 应用热网功率守恒方程式(6)可得:

$$\Phi_{H_slack}^{(n)} = \Phi_{load} + \Phi_{loss}^{(n)} - (\Phi_{E_slack}^{(n)} + \Phi_{ex}) \quad (10)$$

至此完成一次循环,可得 Φ_{H_slack} 的迭代式为:

$$\Phi_{H_slack}^{(n+1)} = \Phi_{load} + \Phi_{loss}^{(n)} - \Phi_{ex} - d_2 - c_2 \left[P_{load} + P_{loss}^{(n)} - \frac{1}{c_1} (\Phi_{H_slack}^{(n)} - d_1) - P_{ex} \right] \quad (11)$$

因迭代过程中潮流会发生变化,故上式中 $\Phi_{loss}^{(n)}$ 、 $P_{loss}^{(n)}$ 不是定值。所以先分别求解一次热网潮流和电网潮流,以得到的 $\Phi_{loss}^{(0)}$ 、 $P_{loss}^{(0)}$ 来近似替代式(11)中的 $\Phi_{loss}^{(n)}$ 、 $P_{loss}^{(n)}$,则迭代式变为:

$$\Phi_{H_slack}^{(n+1)} = \Phi_{load} + \Phi_{loss}^{(0)} - \Phi_{ex} - d_2 - c_2 \left[P_{load} + P_{loss}^{(0)} - \frac{1}{c_1} (\Phi_{H_slack}^{(n)} - d_1) - P_{ex} \right] \quad (12)$$

将上式写为式(13)所示的不动点迭代^[22]形式,则 Φ_{H_slack} 收敛值为式(13)的不动点。

$$\Phi_{H_slack}^{(n+1)} = f(\Phi_{H_slack}^{(n)}) \quad (13)$$

2.2 分解法的收敛性质分析

由推导式(13)的过程可见,该迭代式模拟了图 2 中分解法的系统间的迭代过程。为对此进行验证,以本文第 3 节算例 1 为例,比较分解法和迭代式(13)的收敛过程,结果如图 3 所示。由图可见,两者的收敛趋势基本一致,说明可以基于迭代式(13)来分析分解法的收敛性质。同时,由于式(13)以 $\Phi_{loss}^{(0)}$ 、 $P_{loss}^{(0)}$ 作为损耗的估计值,其收敛值与分解法存在误差,2.3 节将阐述该问题的解决方法。需要说明的是,本文采用的热功率单位为 MW_{th} ,电功率单位为 MW_e ^[19]。

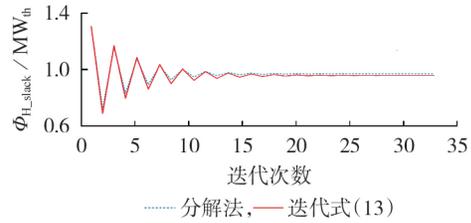


图3 分解法与迭代式(13)的收敛过程

Fig.3 Convergence process of decomposed method and iterative Formula (13)

忽略迭代过程中热损、电损的变化,对式(13)求导可得:

$$\gamma = f'(\Phi_{H_slack}^{(n)}) = c_2/c_1 \quad (14)$$

根据不动点迭代法的收敛性质^[22],可以对分解法的收敛性质进行快速判断:若 $|\gamma| < 1$,则式(13)收敛,且 $|\gamma|$ 越小收敛越快;若 $|\gamma| > 1$,则式(13)发散,分解法的计算过程会出现每迭代一次, Φ_{H_slack} 反而更偏离正确解的现象。

对上述判据可用图 4 进行直观解释,不动点为函数 $y = f(x)$ 与 $y = x$ 的交点。由图 4 可见,当 $|\gamma| > 1$ 时,虽然式(13)存在不动点,但却无法通过迭代方法求得不动点,这就是利用分解法求解可能发散的原因。

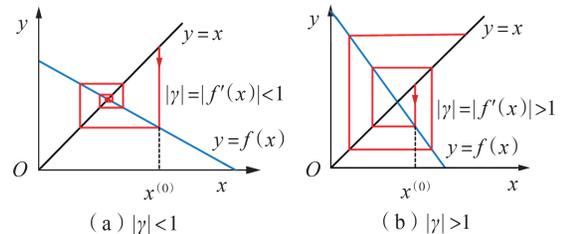


图4 分解法迭代收敛与发散的示意图

Fig.4 Schematic diagram of iterative convergence and divergence for decomposed method

2.3 基于功率守恒原理的联合潮流计算

由于 Φ_{H_slack} 为式(13)的不动点,则可以不经图 2 的迭代而直接联立方程求得 Φ_{H_slack} 的解析解:

$$\Phi_{H_slack} = f(\Phi_{H_slack}) \quad (15)$$

整理后得:

$$\Phi_{H_slack} = \frac{c_1}{c_1 - c_2} (\Phi_{load} + \Phi_{loss}^{(0)} - \Phi_{ex} - d_2) - \frac{c_1 c_2}{c_1 - c_2} \left(P_{load} + P_{loss}^{(0)} + \frac{d_1}{c_1} - P_{ex} \right) \quad (16)$$

由图 3 可知,将 $\Phi_{loss}^{(0)}$ 、 $P_{loss}^{(0)}$ 作为损耗的估计值会导致 Φ_{H_slack} 存在误差。为此,以最新得到的 Φ_{H_slack} 作为初值,再次执行图 2 中的步骤②、③、④、①以获得更准确的热损和电损值。重复上述步骤直至 Φ_{H_slack} 收敛。具体过程见附录图 A1。

下文将上述方法简称为功率守恒法,与分解法进行对比。本文直接用式(16)计算 Φ_{H_slack} ,避免了不动点迭代过程,从而解决了分解法收敛性不确定的问题。虽然功率守恒法也存在迭代过程,但迭代的目标仅是为了更新网损。需注意的是,如果耦合元件参数 c_1 、 c_2 选取不合理,则虽然采用本文方法仍能够收敛,但潮流解并不可行。对此将在第 3 节中结合算例 3 进行分析。

3 算例分析

3.1 算例系统拓扑

算例系统拓扑见附录图 A2,其详细热网、电网参数见文献[19]。热网共有 32 个节点,包含 3 个热源,其中节点 2、32 处为燃气型 CHP,节点 1 根据算例的不同可选为电锅炉或蒸汽型 CHP,热源的出口温度设定为 70 °C;电网共有 8 个节点,其中节点 2、5 将燃气型 CHP 作为电源,节点 1 根据算例的不同可选为电锅炉或者蒸汽型 CHP。选取热网节点 1 作为热网的平衡节点,选取电网节点 2 作为电网的平衡节点。

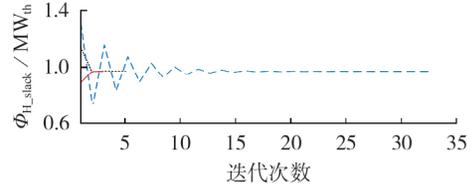
本文采用的仿真软件为 MATLAB,仿真计算机的 CPU 型号为英特尔 i5-7300HQ,频率为 2.5 GHz。

3.2 仿真算例 1

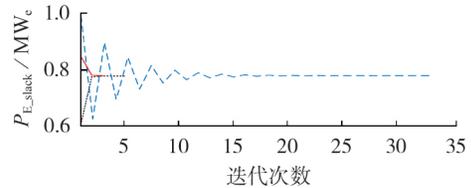
本算例中节点 1 的耦合元件为蒸汽型 CHP。CHP1、CHP2 的耦合元件系数分别如下: $c_1 = -1.55$, $d_1 = 2$; $c_2 = 1.20$, $d_2 = 0$ 。根据式(14)可得 $|\gamma| = 0.77$ 。已知以下条件:热负荷总功率 $\Phi_{load} = 2.164 \text{ MW}_{th}$,热网节点 32 的功率 $\Phi_{ex} = 0.320 \text{ MW}_{th}$,经一次热网潮流计算得到 $\Phi_{loss}^{(0)} = 0.061 \text{ MW}_{th}$;电负荷总功率 $P_{load} = 1.600 \text{ MW}_e$,电网节点 5 的功率 $P_{ex} = 0.240 \text{ MW}_e$,经一次电网潮流计算得到 $P_{loss}^{(0)} = 0.050 \text{ MW}_e$ 。

设置收敛精度 $\varepsilon = 10^{-4} \text{ MW}$,详细的潮流计算结果见附录表 A1 和表 A2。图 5 比较了功率守恒法、分解法和整体法中 Φ_{H_slack} 和 P_{E_slack} 的收敛过程。由图可知,功率守恒法经 3 次迭代收敛,分解法经 31 次迭代收敛,整体法经 5 次迭代收敛,且 3 种方法收敛于

统一结果。在计算时间上,功率守恒法耗时 0.050 s,分解法耗时 0.472 s,整体法耗时 0.623 s。



(a) Φ_{H_slack} 收敛过程



(b) P_{E_slack} 收敛过程

图 5 Φ_{H_slack} 和 P_{E_slack} 收敛过程

Fig.5 Convergence process of Φ_{H_slack} and P_{E_slack}

图 6 在 3 种收敛精度下比较了 3 种方法的迭代次数。可见随着收敛精度的提高,3 种方法下的迭代次数都会增加。同时图中还仿真比较了 $|\gamma| = 0.84$ 与 $|\gamma| = 0.77$ 的情况,可见 $|\gamma|$ 越接近于 1 分解法收敛越慢,而功率守恒法和整体法则不受 $|\gamma|$ 影响。

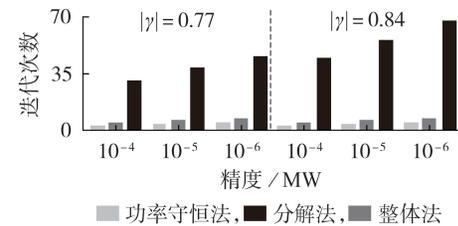


图 6 收敛精度与 $|\gamma|$ 对迭代次数的影响

Fig.6 Effect of convergence accuracy and $|\gamma|$ on number of iterations

算例 1 表明,利用功率守恒法所求结果准确可靠,且计算速度相较于分解法和整体法更快,收敛速度也不受 $|\gamma|$ 取值影响。

3.3 仿真算例 2

本算例中节点 1 的耦合元件为电锅炉。已知以下条件:热负荷总功率 $\Phi_{load} = 2.164 \text{ MW}_{th}$,热网节点 32 的功率 $\Phi_{ex} = 0.320 \text{ MW}_{th}$,经一次热网潮流计算得到 $\Phi_{loss}^{(0)} = 0.062 \text{ MW}_{th}$;除电网节点 1 之外电负荷总功率 $P_{load} = 1.600 \text{ MW}_e$,电网节点 5 的功率 $P_{ex} = 0.240 \text{ MW}_e$,经一次电网潮流计算得到 $P_{loss}^{(0)} = 0.075 \text{ MW}_e$ 。

取 $c_1 = -0.77$ 、 $d_1 = 0$ 、 $c_2 = 0.80$ 、 $d_2 = 0$ 。根据式(14)得到 $|\gamma| = 1.04$ 。由于 $|\gamma| > 1$,分解法将发散,仿真结果见图 7。

由图 7 可知,采用本文的功率守恒法可以避免分解法的发散问题。设置收敛精度 $\varepsilon = 10^{-4} \text{ MW}$,经

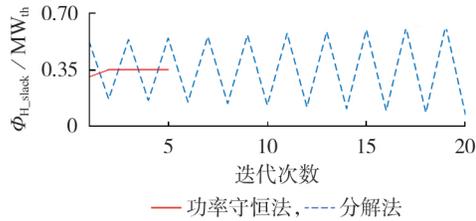


图7 分解法迭代发散现象

Fig.7 Iterative divergence phenomenon of decomposed method

过5次迭代后联合潮流收敛,解得 $\Phi_{H_slack}=0.351 MW_{th}$ 、 $P_{E_slack}=1.787 MW_e$ 。

算例2表明,利用分解法求解联合潮流时可能会发散,而利用功率守恒法则可以解决该问题,其通过式(16)直接得到不动点的值,收敛性不受 $|\gamma|$ 取值影响。

3.4 仿真算例3

在算例1中,若设 $c_1=-3.5$ 、 $c_2=2.5$,可得到不可行解 $\Phi_{H_slack}=-0.161 MW_{th}$,此时CHP吸收热功率,显然不合理。可见耦合元件的参数具有一定的限制,当其取值不合理时,求得的潮流结果会导致耦合元件违背自身的物理性质。由式(16)可知,热、电平衡节点功率可表示为 c_1 、 c_2 的函数。若使求解联合潮流可行,需满足以下约束^[23]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{约束1: } P_{1,\min} < P_{H_slack} < P_{1,\max} \\ \text{约束2: } P_{2,\min} < P_{E_slack} < P_{2,\max} \\ \text{约束3: } \Phi_{loadmin} < \Phi_{H_slack} + \Phi_{E_slack} + \Phi_{EX} < \Phi_{loadmax} \\ \text{约束4: } P_{loadmin} < P_{E_slack} + P_{H_slack} + P_{EX} < P_{loadmax} \\ \text{约束5: } c_{1,\min} < c_1 < c_{1,\max} \\ \text{约束6: } c_{2,\min} < c_2 < c_{2,\max} \end{array} \right. \quad (17)$$

其中,约束1、2分别为CHP1、CHP2的电功率约束;约束3、4分别为系统热负荷、电负荷的上下限约束;约束5、6分别为 c_1 、 c_2 取值范围约束;变量含义与参数设置见附录表A3。

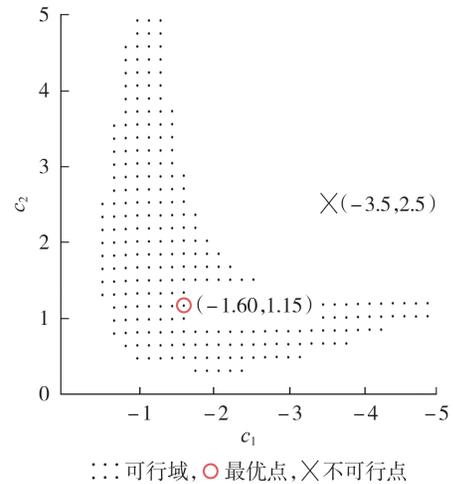
可以进一步在可行域中寻找最优耦合参数,例如使CHP1、CHP2的电功率最接近其额定功率,如式(18)所示。

$$\min (P_{H_slack} - P_{N1})^2 + (P_{E_slack} - P_{N2})^2 \quad (18)$$

其中, P_{N1} 、 P_{N2} 分别为CHP1、CHP2的额定电功率。

图8利用扫描法给出了 (c_1, c_2) 的可行域,同时图中标注了最优参数 $(-1.60, 1.15)$ 以及上文的不可行参数 $(-3.5, 2.5)$ 。由图可见, (c_1, c_2) 的可行域小于 c_1 和 c_2 各自取值范围的笛卡尔积。

算例3表明,当热电负荷需求确定时,利用迭代式可将热电平衡节点功率表示为耦合元件参数的函数,进而可以通过约束条件筛选出可行域,为电热联合系统规划中的设备选型提供参考。

图8 参数 c_1 、 c_2 的可行域Fig.8 Feasible region of parameters c_1 and c_2

4 结论

本文对电热联合潮流的分解法进行了分析研究,并在此基础上提出了新型潮流计算方法即功率守恒法,利用算例对功率守恒法、分解法和整体法进行了比较和验证,得到以下的结论。

(1)现有联合潮流计算方法中,整体法建模完整,适用于高级应用扩展,但求解大规模系统潮流效率不高,且存在病态矩阵的问题;分解法利用了子网络间松耦合的特点,且各子网络可使用已有成熟算法,计算效率较高,但其交互迭代过程并不一定收敛。

(2)功率守恒法能获得与整体法和分解法完全一致的结果,同时计算速度相较于后两者有明显优势。其不但具有分解法各自网络单独计算的优势,而且也解决了分解法的发散问题。

(3)不可随意选取耦合元件的参数,并且基于平衡节点功率的迭代式可以求得耦合元件参数的可行域。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 赵曰浩,彭克,徐丙垠,等. 综合能源系统分层分布式协调控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):253-259.
ZHAO Yuehao, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Hierarchical and distributed coordination control of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 253-259.
- [2] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [3] 程林,张靖,黄仁乐,等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analy-

- sis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):282-287.
- [4] 卫志农, 仲磊磊, 薛滨枫, 等. 基于数据驱动的电-热互联综合能源系统线性化潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 31-37.
WEI Zhinong, ZHONG Leilei, XUE Mingfeng, et al. Linearization flow calculation for integrated electricity-heat energy system based on data-driven[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 31-37.
- [5] 权超, 董晓峰, 姜彤. 基于 CCHP 耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2456-2466.
QUAN Chao, DONG Xiaofeng, JIANG Tong. Optimization planning of integrated electricity-gas community energy system based on coupled CCHP[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2456-2466.
- [6] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5):21-33.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of gas network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 21-33.
- [7] 张世翔, 吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2431-2439.
ZHANG Shixiang, LÜ Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2431-2439.
- [8] 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1627-1634.
PAN Shaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi energy flow[J]. Power System Technology, 2016, 40(6):1627-1634.
- [9] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8):3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):3-11.
- [10] 陈艳波, 姚远, 杨晓楠, 等. 面向电-热综合能源系统的双线性抗差状态估计方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8):47-54.
CHEN Yanbo, YAO Yuan, YANG Xiaonan, et al. Bilinear robust state estimation method for integrated electricity-heat energy systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):47-54.
- [11] 陈皓勇, 王晓娟, 蔡永智, 等. 复杂电力(能源)系统的分布式感知与协同估计/检测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18):1-10.
CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, CAI Yongzhi, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy and energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18):1-10.
- [12] 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.
- [13] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10):2942-2950.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for electric-thermal-gas integrated energy system[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2942-2950.
- [14] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3636-3647.
- [15] MASSRUR H R, NIKNAM T, AGHAEI J, et al. Fast decomposed energy flow in large-scale integrated electricity-gas-heat energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4):1565-1577.
- [16] 夏天, 陈瑜玮, 郭庆来, 等. 基于 PSASP 的电热耦合能源系统潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6):55-61.
XIA Tian, CHEN Yuwei, GUO Qinglai, et al. Power flow calculation based on PSASP for combined thermal and electric energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):55-61.
- [17] 张刚, 张峰, 张利, 等. 考虑多种耦合单元的电气热联合系统潮流分布式计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6594-6604.
ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Distributed algorithm for the power flow calculation of integrated electrical, gas, and heating network considering various coupling units[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(22): 6594-6604.
- [18] 刘述欣, 戴赛, 胡林献, 等. 计及回水管网热损失的电热联合系统潮流模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4):77-81.
LIU Shuxin, DAI Sai, HU Linxian, et al. Power flow model and algorithm of combined power and heat system considering heat loss in return pipe network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):77-81.
- [19] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [20] 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):3934-3942.
- [21] 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 电热联合网络状态估计[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1635-1641.
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation of combined thermoelectric network[J]. Power System Technology, 2016, 40(6):1635-1641.
- [22] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 5版. 北京:清华大学出版社, 2008:215-220.
- [23] LIU X Z, YAN Z, JENKINS N. Optimal coordinated operation of a multi-energy community considering interactions between energy storage and conversion devices[J]. Applied Energy, 2019, 248:256-273.

作者简介:



孙宏宇

孙宏宇(1995—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统建模与潮流计算(E-mail:shy2017@sjtu.edu.cn);

张沛超(1970—),男,江苏连云港人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制、可再生能源并网和能源互联网等(E-mail:pczhang@sjtu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Power flow calculation method of integrated electricity and heat system based on power conservation principle

SUN Hongyu^{1,2}, ZHANG Peichao^{1,2}, DU Wei³, LIU Xuezhai^{1,2}, HE Guoxin³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Power flow calculation represents the basis to analyze the steady-state operation of an integrated electricity and heat system. The multi-energy flow coupling caused by CHP (Combined Heat and Power) and other coupling components results in complicated calculation of combined power flow. Regarding the existing combined power flow calculation approach, the integrated approach suffers from the issues of huge computation burden and ill-conditioned Jacobian matrix. However, the decomposed approach is difficult to proof the algorithm convergence, and its iterative divergence issue cannot be well addressed. Hence, addressing these issues is of interest. For the system in which the slack node is connected with coupling units, the iterative formula of the slack nodes that respectively belong to heat network and the electricity network is derived according to the power conservation principle. Based on this, the convergence property of the decomposed method is analyzed, and the iterative fixed point is considered as an analytical solution of the slack node. Subsequently, a new method of combined power flow analysis is developed. Finally, simulative results of integrated electricity and heat systems prove that the proposed approach is efficient and accurate. It can also be used to solve the divergence problem of decomposition approaches. In addition, the feasible region of coupling parameters is estimated.

Key words: integrated electricity and heat system; power flow calculation; power conservation principle; fixed point; convergence

(上接第53页 continued from page 53)

ring power interaction among microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-44.

作者简介:

魏 春(1987—),男,浙江宁波人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电及新能源优化控制、微电网、智能电网(E-mail: chunwei18@zjut.edu.cn);

徐向志(1994—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研



魏 春

究方向为综合能源系统优化运行(E-mail: xz_940626@163.com);

张有兵(1971—),男,湖北黄石人,教授,博士,主要研究方向为智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控等(E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Non-cooperative game-based optimal operation method of multiple energy hubs

WEI Chun¹, XU Xiangzhi¹, WANG Guofeng¹, ZHANG Youbing¹, PAN Hongwu², HUANG Xiaoming²

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. State Grid Huzhou Power Supply Company, Huzhou 313099, China)

Abstract: The EH (Energy Hub) can promote the cooperative operation of different forms of energy carriers and is the key point to accelerate the research on key technologies of ubiquitous power internet of things. A non-cooperative game-based optimal operation method of multiple EHs is proposed. The single park containing multi-energy system is abstracted into an EH, and the energy production, conversion and storage equipment in EH are modeled, so as to establish the EH framework for multi-energy cooperative operation. On this basis, the non-cooperative game model of multiple EHs based on Nash equilibrium is constructed. Each EH participates in the game with other EHs with the objective function of minimizing daily operation cost, and the equipment output and load balance in each EH are analyzed. Simulative results based on MATLAB show that multiple EHs can make full use of the complementary characteristics of inter-regional loads, so that each EH can optimize the individual operation cost and improve the system flexibility.

Key words: energy hub; multi-energy system; non-cooperative game; dynamic optimization; Nash equilibrium

附录

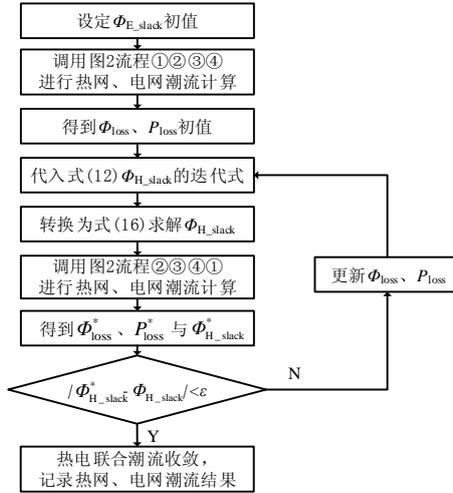


图 A1 功率守恒法流程图

Fig.A1 Flowchart of power conservation method

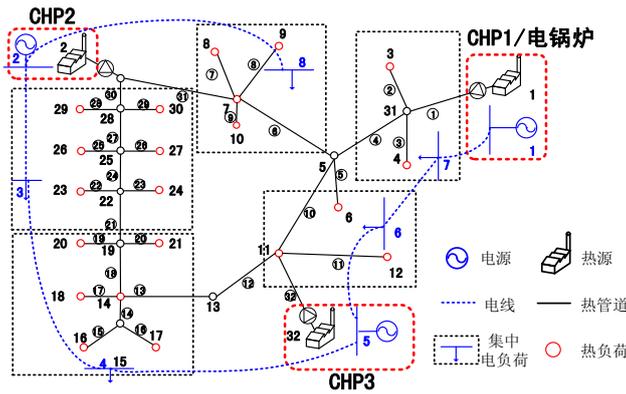


图 A2 算例系统拓扑

Fig.A2 Topology of example system

表 A1 电网计算结果

Table A1 Results of power network calculation

电网节点	1	2	3	4	5	6	7	8
电压模值/p.u.	1.0200	1.0500	1.0351	1.0311	1.0500	1.0141	1.0151	1.0428
电压相位/(°)	8.0493	0.0000	-0.3793	-0.3216	1.7907	2.9644	4.2287	-0.2120

表 A2 热网计算结果

Table A2 Results of heating network calculation

热网节点	1	2	3	4	5	6	7	8
供给温度/(℃)	70.00	70.00	69.35	69.62	69.73	68.63	69.20	68.41
热网节点	9	10	11	12	13	14	15	16
供给温度/(℃)	68.73	68.11	69.56	68.98	69.36	69.23	69.10	68.48
热网节点	17	18	19	20	21	22	23	24
供给温度/(℃)	68.38	68.50	69.15	68.42	68.44	68.98	68.34	68.44
热网节点	25	26	27	28	29	30	31	32
供给温度/(℃)	69.75	69.19	69.25	69.88	69.49	69.44	69.79	70.00

表 A3 可行域约束参数

Table A3 Feasible region constraint parameters

参数	$P_{1,\min}$	$P_{1,\max}$	$P_{2,\min}$	$P_{2,\max}$	Φ_{loadmin}	Φ_{loadmax}	P_{loadmin}	P_{loadmax}	$c_{1,\min}$	$c_{1,\max}$	$c_{2,\min}$	$c_{2,\max}$
数值	0.3MW	1.3 MW	0.2 MW	1.2 MW	1.5MW	3.0MW	1.2MW	2.4MW	-5	-0.2	0.2	5

注： $P_{1,\min}$ 与 $P_{1,\max}$ 分别为 CHP1 电功率的下限与上限； $P_{2,\min}$ 与 $P_{2,\max}$ 分别为 CHP2 电功率的下限与上限； Φ_{loadmin} 与 Φ_{loadmax} 分别为热负荷功率的下限与上限； P_{loadmin} 与 P_{loadmax} 分别为电负荷功率的下限与上限； $c_{1,\min}$ 与 $c_{1,\max}$ 分别为参数 c_1 的下限与上限； $c_{2,\min}$ 与 $c_{2,\max}$ 分别为参数 c_2 的下限与上限；CHP 功率上下限选取基于其额定功率；热、电负荷最大值与最小值参考自文献[21]。