

面向综合能源系统的静态电压稳定性分析

黄雨佳, 孙秋野, 王睿, 黄博南

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省 沈阳市 110819)

Static Voltage Stability Analysis for Integrated Energy System

HUANG Yujia, SUN Qiuye, WANG Rui, HUANG Bonan

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: In response to the static voltage stability problem of multi-energy coupling system, this paper proposed the static voltage stability analysis method for electric-gas-heat integrated energy system (IES). First, each energy carrier and coupling equipment in the IES are modeled and unified solved to obtain the unified Jacobian matrix J . Then, the reduced matrixes J_r , J_R for static voltage stability analysis of IES are derived. J_r considers the effect of multi-energy flow state variables on the reactive power, the physical meaning clear and its computational complexity is small. J_R further considers the influence of the multi-energy flow control variables on voltage, which has less conservative, but the calculation is relatively complex. On this basis, this paper discussed the static voltage stability index based on singular value decomposition of J and J_r , J_R , and explored the influence of energy carriers' load fluctuation on the index of IES and grid voltage stability. Verification by numerical examples, the index contains important margin information about voltage stability of IES, and the reduced matrixes proposed in this paper can better describe the static voltage stability problem in IES.

KEY WORDS: integrated energy system; multi-energy flow calculation; Jacobian matrix; static voltage stability; minimum singular value

摘要: 针对多能耦合情况下的电力系统静态电压稳定性问题, 提出面向电-气-热综合能源系统的静态电压稳定性分析方法。首先对综合能源系统中各个能源载体及其耦合设备进行稳态建模并求解, 得到多能流收敛的统一雅可比矩阵 J 后, 进一步推导出用于综合能源系统静态电压稳定性分析的降维矩阵 J_r 、 J_R 。其中 J_r 考虑了多能流状态变量对无功功率的影响, 物理意义明确且计算简便; J_R 进一步考虑了多能流控制变量对电网电压的影响, 具备更低的保守性, 但计

算相对复杂。在此基础上, 该文讨论了统一雅可比矩阵 J 和降维矩阵 J_r 、 J_R 基于奇异值分解的静态电压稳定性指标, 探究能源载体负荷波动对综合能源系统及电网电压稳定性指标的影响。经算例验证, 所求指标包含了重要的关于综合能源系统中电网电压稳定性的裕度信息, 且降维矩阵可以更好地描述综合能源系统中的静态电压稳定性问题。

关键词: 综合能源系统; 多能流计算; 雅可比矩阵; 静态电压稳定性; 最小奇异值

0 引言

随着工业生产和居民生活对能源的需求与环境友好的矛盾日益增加, 各领域对能源互联网^[1]、综合能源系统^[2]的关键问题研究成为了能源改革的新热点。电力系统作为主要的能源载体与天然气系统和热力系统的耦合关系日益复杂, 为此, 深入研究其他能源载体与电力系统间的相互影响及耦合后电力系统的运行稳定性变化情况是十分必要的。

目前, 国内外学者针对电-气-热耦合系统已展开大量研究和分析。研究内容主要集中在综合能源系统建模、能量流计算、经济调度与优化、多能系统稳态分析和安全性等方面。其中, 文献[3]针对电-热耦合系统, 提出统一求解和分立求解两种方法并对比了多能流计算的稳态结果, 所得的热网潮流分布与商业软件计算结果一致, 验证了牛顿-拉夫逊法应用到电-热耦合多能流计算中的正确性。文献[4]建立了电-气-热耦合系统的稳态模型, 考虑了燃气轮机的阀点效应、热电联产(combined heat and power, CHP)机组和燃气锅炉的部分负荷特性对能源系统潮流分布的影响, 详细的讨论了多种耦合设备给各个能源载体带来的依赖关系。文献[5]对电-气-热综合能源系统进行统一求解, 并针对电力系统并网和孤岛两种情况进行多能流计算。文献[6]

基金项目: 国家自然科学基金项目(61433004, 61573094, 61603085)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (61433004, 61573094, 61603085).

则提出一种针对能源互联网的优化控制框架。在综合能源系统的稳态分析方面,文献[7]考虑电网、集中供热系统(district heating system, DHS)的不同时间尺度,进行多阶段的准稳态能流计算,并给出了多种故障发生前后的各阶段能流结果对比。文献[8]对天然气系统(natural-gas system, NGS)进行灵敏度分析,考虑了天然气气质及分布式注气点的引入对电力系统电压支撑能力的影响。文献[9]借鉴电力系统思想,建立了用于定位电-气耦合系统薄弱环节的燃气压力-节点功率灵敏度矩阵。安全性方面,文献[10]在综合能源系统中考虑了下垂控制及等微增率准则,提出一种兼顾能量枢纽安全性与经济性的双层控制方法。

上述文献对于综合能源系统的研究,更偏向于多能流计算或提出追求经济性的优化方法。针对稳态情况下,综合能源系统稳定程度的讨论则少之又少,且未给出稳定裕度信息。此外,天然气系统、热力系统通过耦合设备作为电力系统的源或者负荷,一定会影响到电网原有的潮流分布,进而对电压稳定性造成不同程度的影响,导致更易出现电压崩溃的状况。本文则对耦合状态下的电力系统电压进行静态稳定性分析,建立面向电-气-热综合能源系统的静态电压稳定指标,得到稳定裕度信息。

其关键点在于考虑其他能源载体耦合状态下的能量交互对电网电压及其控制变量无功功率的影响。针对这一问题,本文对电-气-热综合能源系统及耦合设备进行稳态建模并求解,得到多能流收敛后的统一雅可比矩阵,并进一步推导出降维矩阵,从而建立面向综合能源系统的静态电压稳定性指标。最后讨论各能源网络负荷波动对电力系统电压稳定性的影响,验证用于判定综合能源系统中静态电压稳定性的降维矩阵的正确性。

1 综合能源系统的稳态模型

1.1 电力系统稳态模型

综合能源系统中,电-气-热各个能源载体中节点的控制变量偏差方程构成了综合能源系统稳态模型。电力系统的潮流计算与传统系统的交流潮流计算一致,节点功率偏差方程可写为:

$$\Delta P_i = P_i^{GG} + P_i^{CHP} + P_i^{EG} - P_i^{ED} - P_i^{GC} - P_i^{HP} - P_i^{EB} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{EG} + Q_i^{SH} - Q_i^{ED} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中:各变量含义见表1; G_{ij} 、 B_{ij} 为导纳矩阵的实部和虚部; P_i^{EG} 、 Q_i^{EG} 为发电机注入功率; P_i^{ED} 、 Q_i^{ED} 为母线 i 处电力负荷消耗功率; P_i^{GG} 、 P_i^{CHP} 分别为燃气发电机、CHP 机组注入到母线 i 的有功功率; P_i^{GC} 、 P_i^{HP} 、 P_i^{EB} 分别为电动压缩机,热网循环泵以及电锅炉消耗的有功功率; Q_i^{SH} 为无功补偿器注入的无功功率。

表1 电-气-热各能源载体的比较

Tab. 1 Comparison between power system, gas system and heat system

分类	电力系统	天然气系统	热力系统
变量	电压相角 θ		质量流 m
	电压幅值 V	节点压力 Π	供水温度 T^s
	有功功率 P	气体流量 f	回水温度 T^r
	无功功率 Q		热功率 Φ
节点类型	平衡节点		平衡节点
	PV 节点	压力已知节点, 流量已知节点	ΦT^s 节点
	PQ 节点		ΦT^r 节点
网络拓扑约束	节点电流定律	节点流量方程	节点流量方程
	回路电压定律	回路压力方程	回路压力方程

1.2 天然气系统稳态模型

在假设天然气管道两端没有高度差且气体等温流动的情况下^[11], 节点流量偏差方程为

$$\Delta f_i = f_i^{GS} - f_i^{GD} - f_i^{GG} - f_i^{CHP} - f_i^{GB} - f_i^{GC} - \sum_{j \in i} C_{ij}^{Gp} \text{sign}_{ij} \sqrt{\text{sign}_{ij} (\Pi_i^2 - \Pi_j^2)} \quad (3)$$

式中: f_i^{GS} 、 f_i^{GD} 分别为节点 i 处气源注入和负荷所需流量; f_i^{GG} 、 f_i^{CHP} 、 f_i^{GB} 则为燃气发电机、CHP 机组和燃气锅炉消耗的天然气流量; C_{ij}^{Gp} 为天然气管道常数; sign_{ij} 表示管道内天然气的流动方向, 当节点 i 的压力大于节点 j 时, sign_{ij} 为 +1, 反之为 -1。

1.3 热力系统稳态模型

热力系统的能量传输主要以热水或蒸汽的形式, 从热源至消费者。所以热力网络在满足基尔霍夫定律的同时, 还包括温度求解模型:

$$T_{\text{end}} = (T_{\text{start}} - T_a) e^{\frac{-\lambda L}{C_p \dot{m}}} + T_a \quad (4)$$

$$(\sum \dot{m}_{\text{out}}) T_{\text{out}} = \sum (\dot{m}_{\text{in}} T_{\text{in}}) \quad (5)$$

式(4)是管道的温降方程, 与管道长度和环境温度有关, 式中: T_{end} 、 T_{start} 分别为管道末端、首端温度; T_a 为环境温度; λ 为单位管道的热传导系数; L 表示管道长度。式(5)用来求多条管道内的质量流混合后离开节点的温度。通常热源处的供热温度 T^s

和混合前每个负载的出口温度 T^r 已知。未知节点的温度则采用上述方程计算。热力系统的偏差方程为：

$$\Delta\phi_i = \phi_i^{EB} + \phi_i^{GB} + \phi_i^{CHP} - \phi_i^{HD} - \sum_{j \in i} C_p \dot{m}_{ij} (T_i^s - T_i^r) \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_i = B_h K_h \dot{m} |\dot{m}| \quad (7)$$

$$\Delta T_i^s = C_s T_i^s - B_s \quad (8)$$

$$\Delta T_i^r = C_r T_i^r - B_r \quad (9)$$

式中： ϕ_i^{EB} 、 ϕ_i^{GB} 、 ϕ_i^{CHP} 分别为电锅炉；燃气锅炉和 CHP 机组为热网提供的热功率； ϕ_i^{HD} 为节点负荷所需热功率； C_p 为水的比热容； $\dot{m}_{ij}$ 为节点 i 至节点 j 段管道的质量流。当热网存在环路时，闭环回路内的水头压力损失总和为 0；矩阵 B_h 为回路-网络关联矩阵^[3]； K_h 为管道的阻力系数； C_s 、 C_r 为温度系数矩阵； B_s 、 B_r 是包含温度、质量流的列向量，通过式(4)、(5)可得。

1.4 耦合设备模型建立

耦合设备实现能量的交互、分配等功能。为充分考虑各个能源载体间的能量转换关系，本文主要介绍下述耦合设备模型。

燃气锅炉、CHP 机组、燃气发电机作为天然气网络的负荷，分别为热网和电网提供能量，模型^[4,12]如下：

$$f_i^B = 3.412 \frac{\phi_i^B}{\eta_i^B \text{GHV}} \quad (10)$$

$$f_i^{CHP} = 3.412 \frac{P_i^{CHP} + \phi_i^{CHP}}{\eta_i^{CHP} \text{GHV}} \quad (11)$$

$$f_i^{GG} = \frac{a_i^{GG} (P_i^{GG})^2 + b_i^{GG} P_i^{GG} + c_i^{GG}}{\text{GHV}} \quad (12)$$

式中： η_i^B 、 η_i^{CHP} 分别为燃气锅炉和 CHP 机组的转换效率； a_i^{GG} 、 b_i^{GG} 、 c_i^{GG} 为第 i 台燃气发电机的运行系数；GHV 为天然气热值，BTU/m³；3.412 作为单位转换系数，将 W 转换为 BTU/h。

电动压缩机、循环泵以及电锅炉作为电力系统负荷，为天然气网络和热网提供能量。其模型如下：

$$P_i^{GC} = \frac{746 \times 10^{-6}}{3600} E_i^{GC} \quad (13)$$

$$P_i^{HP} = \frac{\dot{m}_i^{HP} g H_p}{10^6 \eta_{HP}} \quad (14)$$

$$P_b = \frac{\phi_b}{\eta_b} \quad (15)$$

式中： E_i^{GC} 是压缩机所需能量(马力)，该部分能量由

电网提供时，消耗电功率为 P_i^{GC} ； η_{HP} 、 η_b 分别为循环泵效率和电锅炉的产热效率； H_p 为水泵扬程。

2 面向综合能源系统的静态电压稳定指标建立

2.1 综合能源系统稳态求解

本文采用多能流统一求解法，综合电-气-热各子系统的稳态模型，并考虑耦合设备带来的多能流状态变量与控制变量间的相互依赖关系，将非线性方程组表述为

$$\begin{cases} \Delta P(\theta, V, \Pi, m, T^r) = 0 \\ \Delta Q(\theta, V) = 0 \\ \Delta f(\theta, V, \Pi, m, T^r) = 0 \\ \Delta(\phi, \sigma)(\theta, V, m, T^s) = 0 \\ \Delta T^s(T^s) = 0 \\ \Delta T^r(T^r) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

所述公式分别代表电力系统节点有功功率，无功功率方程、天然气系统的节点流量平衡方程以及区域热网的热力-水力平衡方程与状态变量 $\mathbf{x} = [\theta \ V \ \Pi \ \dot{m} \ T^s \ T^r]$ 的包含关系。将非线性方程组在稳态运行点 $\mathbf{x}_0$ 处进行 Taylor 级数展开，略去二次项及以上高次项，可得用于更新状态变量的线性化多能流修正方程：

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{J}(\theta, V, \Pi, m, T^s, T^r) \Delta \mathbf{x} \quad (17)$$

式中雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 表达如下：

$$\mathbf{J}(\theta, V, \Pi, m, T^s, T^r) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} & \mathbf{J}_{P\Pi} & \mathbf{J}_{Pm} & 0 & \mathbf{J}_{PT^r} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{J}_{f\theta} & \mathbf{J}_{fV} & \mathbf{J}_{f\Pi} & \mathbf{J}_{fm} & 0 & \mathbf{J}_{fT^r} \\ \mathbf{J}_{[\phi, \sigma]\theta} & \mathbf{J}_{[\phi, \sigma]V} & 0 & \mathbf{J}_{[\phi, \sigma]m} & \mathbf{J}_{[\phi, \sigma]T^s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{J}_{T^s T^s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{J}_{T^r T^r} \end{bmatrix} \quad (18)$$

非对角块矩阵中，非零矩阵的数学表达式为偏导数矩阵，如 $\mathbf{J}_{QV} = \partial \Delta Q / \partial \Delta V$ ；其物理含义则代表变量间的相互耦合，如电力系统中节点电压变化对无功功率的影响，同理可得其他子矩阵的意义。若天然气系统中存在电动压缩机、热网中存在电循环泵，那么 $\mathbf{J}_{P\Pi}$ 、 $\mathbf{J}_{Pm}$ 存在。如果电网的平衡节点采用燃气发电机供能，那么 $\mathbf{J}_{f\theta}$ 、 $\mathbf{J}_{fV}$ 存在；同理，电网中若存在以电定热模式的 CHP 机组， $\mathbf{J}_{[\phi, \sigma]\theta}$ 、 $\mathbf{J}_{[\phi, \sigma]V}$ 为非 0 矩阵。若热网的平衡节点以电锅炉或燃气锅

炉供能, 那么矩阵 J_{Pm} 、 J_{PT^r} 、 J_{fm} 、 J_{fT^r} 都存在。

2.2 降维矩阵的建立

基于上述对综合能源系统耦合机制的分析可知, 统一雅可比矩阵 J 作为综合能源系统的全局指标, 存在多种耦合关系。当该矩阵发生奇异时, 有可能是电网功角、电压引起的静态稳定性问题, 也可能是热网、气网或更为复杂的情况造成的稳定性问题, 因此仅仅用统一雅可比矩阵 J 不足以说明静态电压稳定性。为解决此问题, 本文分以下 2 种情况建立降维矩阵作为面向综合能源系统的静态电压稳定性指标。

2.2.1 考虑多能流状态变量对无功功率的影响

传统电力系统的静态电压稳定性研究中, 可通过挖掘表示无功-电压间强耦合关系的 J_{QV} 来实现。但综合能源系统中, 无功功率的注入还与电网相角 θ 、气网压力 Π 和热网状态变量存在间接耦合, 对综合能源系统的静态电压稳定性的研究有着重要意义。因此本节在 J_{QV} 的基础上, 考虑线性化多能流方程(17)中的状态变量 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\Pi$ 、 Δm 、 ΔT^s 、 ΔT^r 对无功功率的影响。基于上述分析并结合式(18), 列写方程组如下:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{P\Pi} & J_{Pm} & 0 & J_{PT^r} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{f\theta} & J_{fV} & J_{f\Pi} & J_{fm} & 0 & J_{fT^r} \\ J_{[\phi,\sigma]\theta} & J_{[\phi,\sigma]V} & 0 & J_{[\phi,\sigma]m} & J_{[\phi,\sigma]T^s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{T^sT^s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{T^rT^r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\Pi \\ \Delta m \\ \Delta T^s \\ \Delta T^r \end{bmatrix} \quad (19)$$

求解上述方程组, 推导得出多能流方程中的无功功率与电压的关系为

$$\Delta Q = J_r \Delta V \quad (20)$$

式中 J_r 的矩阵维数等于综合能源系统中电网 PQ 节点的个数, 表达式如下:

$$J_r = J_{QV} - J_{F\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{FV} \quad (21)$$

其中:

$$\begin{cases} J_{F\theta} = J_{Q\theta} [I + J_{P\theta}^{-1} (J_{P\Pi} J_{f\Pi}^{-1} J_{fm} - J_{Pm}) \cdot \\ \quad J_{(\phi,\sigma)m}^{-1} J_{\phi\theta} - J_{P\theta}^{-1} J_{P\Pi} J_{f\Pi}^{-1} J_{f\theta}]^{-1} \\ J_{FV} = J_{PV} - (-J_{P\Pi} J_{f\Pi}^{-1} J_{fm} + J_{pm}) J_{(\phi,\sigma)m}^{-1} J_{\phi V} - \\ \quad J_{P\Pi} J_{f\Pi}^{-1} J_{fV} \end{cases} \quad (22)$$

通过式(21)、(22)可以看出, 如果不存在电网静

态角度稳定性以及气网、热网稳定性问题, 即子矩阵 $J_{f\Pi}$ 、 $J_{(\phi,\sigma)m}$ 、 $J_{P\theta}$ 的逆存在, 那么 J_r 矩阵可用于描述小扰动发生时, 网络中无功功率注入的变化对电压大小的影响。由推导过程可知, 此种无功功率注入的变化即包括了自身波动, 又包括了耦合网络状态变量变化导致的无功功率波动。那么当 J_r 奇异时, 统一雅可比矩阵 J 奇异, 即综合能源系统失稳。因此, J_r 矩阵物理意义明确且计算简便, 可用于指示综合能源系统中的静态电压稳定性问题。

2.2.2 考虑多能流控制变量对电压的影响

多能流控制变量通过耦合设备和状态变量的传递关系与电压分别有着直接和间接的耦合关系。本节在 2.2.1 情况的基础上, 继续考虑多能流控制变量对电压的影响。列写方程组如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P & \Delta Q & \Delta f & \Delta(\phi,\sigma) & \Delta T^s & \Delta T^r \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{P\Pi} & J_{Pm} & 0 & J_{PT^r} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{f\theta} & J_{fV} & J_{f\Pi} & J_{fm} & 0 & J_{fT^r} \\ J_{[\phi,\sigma]\theta} & J_{[\phi,\sigma]V} & 0 & J_{[\phi,\sigma]m} & J_{[\phi,\sigma]T^s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{T^sT^s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{T^rT^r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\Pi \\ \Delta m \\ \Delta T^s \\ \Delta T^r \end{bmatrix} \quad (23)$$

推导得到包含多能流控制变量对电压影响的关系表达式为

$$\Delta V = J_r^{-1} [\Delta Q - J_{F\theta} J_{P\theta}^{-1} (\Delta P - M_1 \Delta f - M_2 \Delta(\phi,\sigma) - M_3 \Delta T^s - M_4 \Delta T^r)] \quad (24)$$

式中 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 是由各个能源载体自身及相互间的耦合关系构成的系数矩阵:

$$\begin{cases} M_1 = J_{P\Pi} J_{f\Pi}^{-1} \\ M_2 = (J_{Pm} - J_{P\Pi} J_{f\Pi}^{-1} J_{fm}) J_{(\phi,\sigma)m}^{-1} \\ M_3 = -M_2 J_{(\phi,\sigma)T^s} J_{T^sT^s}^{-1} \\ M_4 = (J_{PT^r} - M_1 J_{fT^r} - M_2) J_{T^rT^r}^{-1} \end{cases} \quad (25)$$

由于在实际系统中, 恒功率负载的阻抗增量表现为负特性, 由此产生的“负阻抗”特性易造成系统失稳, 且随着 AC/AC 或 AC/DC 型负载的日益增加, 恒功率负载的渗透率显著增加^[17]。因此本文假定所有负载均为恒功率负载以判定系统的静态电压稳定性。对于恒功率负荷模型, $P/Q = \text{ctg} \varphi$, φ 为功率因数角^[15]。同时, 电-气、电-热、电-气-热网络间的耦合设备又与电力系统通过有功功率进

行能量交换。所以式(24)可进一步调整：

$$\Delta V = J_r^{-1} [\Delta Q - J_{F\theta} J_{P\theta}^{-1} (M_{P \rightarrow Q} \Delta Q - M_1 M_{f \rightarrow P} \cdot M_{P \rightarrow Q} \Delta Q - M_2 M_{(\phi, \sigma) \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q} \Delta Q - M_3 M_{T^s \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q} \Delta Q - M_4 M_{T^r \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q} \Delta Q)] \quad (26)$$

式中： $M_{P \rightarrow Q}$ 是由 $\text{ctg}\varphi$ 构成的矩阵； $M_{f \rightarrow P}$ 、 $M_{T^r \rightarrow P}$ 、 $M_{(\phi, \sigma) \rightarrow P}$ 和 $M_{T^s \rightarrow P}$ 是包含由能量转换关系造成的天然气系统、热力系统控制变量对电力系统影响的稀疏矩阵。其中， $M_{f \rightarrow P}$ 可由耦合模型式(13)求得， $M_{T^r \rightarrow P}$ 矩阵内部元素值可通过联立式(4)–(6)、(15)得到； $M_{(\phi, \sigma) \rightarrow P}$ 通过式(15)确定，是由电锅炉产热效率 η_b 构成的稀疏矩阵； $M_{T^s \rightarrow P}$ 的存在是由雅可比子矩阵 $J_{(\phi, \sigma)T^s}$ 带来的间接影响，可表达为 $M_{T^s \rightarrow (\phi, \sigma)} M_{(\phi, \sigma) \rightarrow P}$ ，其中 $M_{T^s \rightarrow (\phi, \sigma)}$ 由式(6)计算。现假设电力系统、天然气系统和热力系统分别只有1个平衡节点，那么各矩阵维数可表示为：

$$\begin{cases} M_{P \rightarrow Q} : (N_{Enode} - 1) \times N_{PQ} \\ M_{f \rightarrow P} : (N_{Gnode} - 1) \times (N_{Enode} - 1) \\ M_{T^r \rightarrow P} : (N_{Hnode} - 1) \times (N_{Enode} - 1) \\ M_{(\phi, \sigma) \rightarrow P} : N_{Hpipe} \times (N_{Enode} - 1) \\ M_{T^s \rightarrow P} : (N_{Hnode} - 1) \times N_{Hpipe} \end{cases}$$

式中： N_{Enode} 、 N_{PQ} 分别为电力系统的节点总数及PQ节点个数； N_{Hnode} 、 N_{Hpipe} 分别为热力系统的节点个数和管道数量； N_{Gnode} 为天然气系统的节点个数。

由式(26)，进一步推出综合能源系统中无功功率与电压的关系为

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (27)$$

式中 J_R 的矩阵维数等于综合能源系统中电网PQ节点的个数，表达式如下：

$$J_R = \{I - J_{F\theta} J_{P\theta}^{-1} [M_{P \rightarrow Q} - M_1 M_{f \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q} - M_4 M_{T^r \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q} - (M_2 + M_3 M_{T^s \rightarrow (\phi, \sigma)}) M_{(\phi, \sigma) \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q}]\}^{-1} J_r \quad (28)$$

通过式(27)、(28)可知，如果不存在静态功角以及其他静态稳定性问题，那么 J_R 奇异时，对应综合能源系统发生静态电压稳定性问题。 J_R 矩阵在表达网络无功功率注入变化对电网电压影响的同时，还包括了耦合系统控制变量的变化对电压的影响，但同时也会使计算更为复杂。在评估 J_R 的时间复杂度时， J_R 和 J_r 的运行上限均为 $O(n^3)$ ，但针对考虑乘法运算次数的矩阵计算复杂度来讲， J_R 相比 J_r 会多执行如下几项最高项： $O(N_{PQ}^3)$ 、 $O(N_{Hnode}^3)$ 、 $O(N_{Enode}^3)$ 、

N_{Hnode})、 $O(N_{Enode} N_{Hnode}^2)$ 、 $O(N_{Enode} N_{Hnode} N_{Hpipe})$ 、 $O(N_{Enode} N_{Gnode} N_{Hnode})$ 。

由于本文针对包含电–气–热的综合能源系统进行建模，那么在降维矩阵 J_R 的计算过程中，上述表达式必然存在，即 J_R 的运算次数必然高于 J_r 且具体计算次数由综合能源系统的网络规模决定。

上述推导表明，在寻找适合于综合能源系统静态电压稳定性研究的矩阵指标时，降维矩阵 J_r 和 J_R 相比统一雅可比矩阵 J 有更明确的物理含义。如果系统经历静态电压稳定问题，则降维矩阵会趋向于奇异矩阵。依据上述两种情况，所推导出的矩阵各有利弊。其中 J_r 考虑了多能流状态变量对电网无功功率的影响，推导容易且计算复杂度小； J_R 同时考虑了多能流状态变量、控制变量对电压的影响，任意一种耦合均能通过降维矩阵 J_R 体现出对电网电压的影响，但 J_R 的推导和计算更为复杂。

2.3 综合能源系统中静态电压稳定裕度求解

奇异值分解^[16]是处理包含矩阵问题的有力工具，文献[13-15]通过奇异值分解挖掘电力系统雅可比矩阵信息，研究了电力系统独立运行时的静态电压指标。本文则借鉴该思想处理统一雅可比矩阵 J ，若 J 是 n 阶实矩阵，则给出该矩阵奇异值分解结果：

$$J = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^n \delta_i u_i v_i^T \quad (29)$$

式中： $\Sigma = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$ 为统一雅可比矩阵对应的奇异值； U 、 V 的列向量 u_i 、 v_i 分别称为 J 的左、右奇异向量。当综合能源系统存在稳态运行点时，矩阵 J 的秩为 n ，设任一矩阵 J' 的秩为 k ，且 $k < n$ ，得 J' 对应的奇异值分解结果为

$$J' = \sum_{i=1}^k \delta_i u_i v_i^T \quad (30)$$

那么：

$$\min_{\text{rank}(J')=k} \|J - J'\|_2 = \delta_{k+1} \quad (31)$$

即统一雅可比矩阵 J 的奇异值是指 J 到所有秩亏矩阵集 J' 的2范数距离，也就是该矩阵距离奇异的程度，因此本文将奇异值分解得到的最小奇异值 $\delta_{\min}$ 定义为综合能源系统当前运行点的稳定裕度。同理，将降维矩阵 J_r 、 J_R 求得的 $\delta_{\min}$ 作为耦合系统中静态电压稳定裕度。

现将综合能源系统稳态求解的多能流方程式(17)与奇异值分解公式(29)结合可得：

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}^{-1} \Delta \mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{u}_i^T \mathbf{v}_i}{\delta_i} \Delta \mathbf{F} \quad (32)$$

由式(32)可知, 当利用统一雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 求得的奇异值 δ_i 足够小, 即系统接近奇异时, 控制变量 $\Delta \mathbf{F}$ 或统一雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 发生很小的变化均会给状态变量 $\mathbf{x} = [\theta \ V \ \Pi \ \dot{m} \ T^s \ T^r]$ 带来很大的波动。但 $\mathbf{J}$ 求得的 δ_i 发生变化时, 并不能明确的指示出是否为静态电压稳定性问题造成的。若将无功-电压关系式(20)、(27)与式(29)结合:

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_r^{-1} \Delta \mathbf{Q} = \sum_{i=1}^{n_{PQ}} \frac{\mathbf{u}_{ri}^T \mathbf{v}_{ri}}{\delta_{ri}} \Delta \mathbf{Q} \quad (33)$$

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_R^{-1} \Delta \mathbf{Q} = \sum_{i=1}^{n_{PQ}} \frac{\mathbf{u}_{Ri}^T \mathbf{v}_{Ri}}{\delta_{Ri}} \Delta \mathbf{Q} \quad (34)$$

由式(33)、(34)可知, 控制变量 $\Delta \mathbf{Q}$ 及降维矩阵发生的变化均可表现为电压变化, 且降维矩阵计算得到的奇异值 δ_{ri} 、 δ_{Ri} 越小, $\Delta \mathbf{Q}$ 及降维矩阵发生的变化对电压的影响越大。所以准确判定耦合系统的静态电压稳定裕度是很必要的。

3 算例分析

基于上述理论和推导, 本文对 IEEE 9-NGS6-DHS7 和 IEEE 14-NGS20-DHS14 两个综合能源系统的统一雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 和降维矩阵 $\mathbf{J}_r$ 、 $\mathbf{J}_R$ 进行稳定裕度求解。通过负荷的变化得到 3 个矩阵所对应的静态电压稳定裕度的变化, 从而验证表征耦合状态下电力系统静态电压稳定性矩阵指标的适用性, 所有仿真通过 Matlab 实现。

3.1 算例 1

如图 1 所示的小型综合能源系统。该系统中, 电网为 IEEE 9 节点系统, 节点 1 为平衡节点, 节点 2、3 为 PV 节点, 无功功率上限分别设定为 150、48 和 48 MW。6 节点气网和 7 节点热网的管道参数、

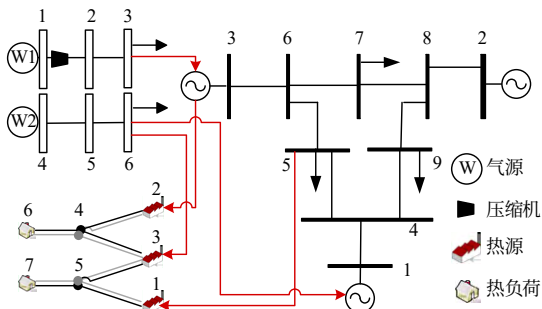


图 1 9-6-7 电气热综合能源系统
Fig.1 IEEE 9-NGS6-DHS7 IES

初始负荷量及耦合设备参数详见文献[12]。耦合设备的节点连接情况见表 2。

表 2 算例 1 中各子系统的节点配置

耦合设备	电力系统	天然气系统	热力系统
燃气发电机	1	6	—
电锅炉	5	—	1
CHP	3	3	2
燃气锅炉	—	6	3

该网络共有 33 个状态变量待求解, 包含 6 个节点电压, 所以统一雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 为 33 阶, 降阶矩阵 $\mathbf{J}_r$ 、 $\mathbf{J}_R$ 为 6 阶。当只考虑多能流状态变量对电压的

影响时, 根据 2.2.1 的理论分析和表 2 所示的耦合设备, 可求得降维矩阵 $\mathbf{J}_r$ 为

$$\mathbf{J}_r = \mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta} \mathbf{J}_{P\theta}^{-1} \mathbf{J}_{PV} \quad (35)$$

由于此网络中不存在电动压缩机和工作在以电定热模式的 CHP 机组, 所以 $\mathbf{J}_{F\theta}$ 、 $\mathbf{J}_{FV}$ 中不存在 $\mathbf{J}_{PIT}$ 、 $\mathbf{J}_{\phi\theta}$ 、 $\mathbf{J}_{\phi V}$, 即式(21)中的 $\mathbf{J}_{F\theta}$ 、 $\mathbf{J}_{FV}$ 表达式仅为 $\mathbf{J}_{Q\theta}$ 、 $\mathbf{J}_{QV}$ 进一步考虑多能流控制变量对电压的影响, 推导得降维矩阵 $\mathbf{J}_R$:

$$\mathbf{J}_R = \{ \mathbf{I} - \mathbf{J}_{Q\theta} \mathbf{J}_{P\theta}^{-1} [\mathbf{M}_{P \rightarrow Q} - \mathbf{M}_4 \mathbf{M}_{T^r \rightarrow P} \mathbf{M}_{P \rightarrow Q} - (\mathbf{M}_2 + \mathbf{M}_3 \mathbf{M}_{T^s \rightarrow (\phi, \sigma)}) \mathbf{M}_{(\phi, \sigma) \rightarrow P} \mathbf{M}_{P \rightarrow Q}] \}^{-1} \mathbf{J}_r \quad (36)$$

系数矩阵 $\mathbf{M}_2$ 、 $\mathbf{M}_3$ 、 $\mathbf{M}_4$ 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{M}_2 = \mathbf{J}_{Pm} \mathbf{J}_{(\phi, \sigma)m}^{-1} \\ \mathbf{M}_3 = -\mathbf{M}_2 \mathbf{J}_{(\phi, \sigma)T^s} \mathbf{J}_{T^s T^r}^{-1} \\ \mathbf{M}_4 = (\mathbf{J}_{PT^r} - \mathbf{M}_2) \mathbf{J}_{T^r T^r}^{-1} \end{cases} \quad (37)$$

现对算例 1 中的 3 个矩阵 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{J}_r$ 、 $\mathbf{J}_R$ 分别进行静态电压稳定裕度求解。由于统一雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 对应的稳定裕度值过小, 将该值扩大 100 倍以便于观察。如图 2 所示, 当逐渐增加电力系统末端节点 7 处的负荷功率至 $\Delta S=0.8\text{pu}$ 之后, 3 个矩阵的稳定裕度均大幅降低, 此变化是因为电力系统节点 2、3 处的无功功率被耗尽, 导致 PV 节点转换为 PQ 节点。数学角度上, 统一雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 和降维矩阵 $\mathbf{J}_r$ 、 $\mathbf{J}_R$ 的维数变大, 所以矩阵更趋于奇异; 物理角度上, PV 节点个数降低, 系统的功率调节能力下降, 趋于不稳。当 $\Delta S=2\text{pu}$ 时, $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{J}_r$ 、 $\mathbf{J}_R$ 的静态电压稳定裕度趋近于 0, 系统电压存在稳定性问题。

由表 2 可知, 耦合网络中, 热网平衡节点处的供能设备电锅炉作为电网节点 5 处的负荷, 即热网

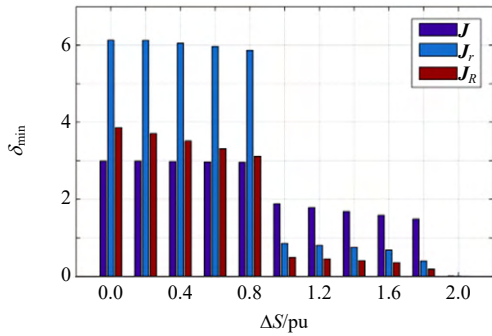


图2 J 、 J_r 、 J_R 的最小奇异值随电力负荷增加的变化

Fig. 2 The variation of the minimum singular value of J , J_r , J_R with the increase of electric load

负荷变化也体现为电网的负荷变化。如图3所示,当热负荷增量达到80MW后,降维矩阵所求得稳定裕度大幅降低,当热网末端的负荷功率增量达到280MW时,静态电压稳定裕度趋于0。如图4所示,此时的电网电压水平也明显降低,电锅炉消耗的电功率由初始的95.3MW升至377.1MW。

热负荷增加的过程中,气网节点6的压力也逐渐降低。因为算例1中的热力系统平衡节点的源由电网供电,而电力系统的平衡节点所需能量由天然气系统提供,所以热力系统的负荷波动会同时影响

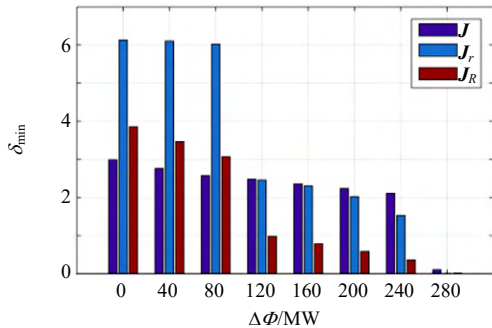


图3 J 、 J_r 、 J_R 的最小奇异值随热负荷增加的变化

Fig. 3 The variation of the minimum singular value of J , J_r , J_R with the increase of heat load

电力系统、天然气系统的网络状态。但热负荷增量为280MW时,图4所示的气网末端节点压力仅降低50kPa,天然气系统并未发生大幅波动,仿真结果进一步说明了:当前网络状态下,综合能源系统的稳定性问题是由电压引起的。

由图2、3的稳定裕度结果可知, J 作为统一雅可比矩阵,得到的稳定裕度 $\delta_{\min}$ 数值非常小。一方面是由于该矩阵维数过大,另一方面是统一雅可比矩阵 J 包含多种耦合关系, $\delta_{\min}$ 是综合能源系统的全局指标,该指标针对电压波动的变化并不明显,只有在接近静态分叉点时才大幅降低。而降维矩阵

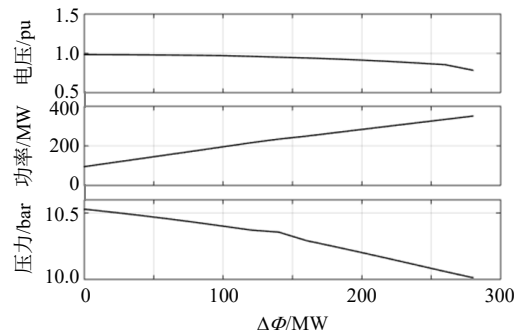


图4 电网节点5电压、热网电锅炉消耗功率以及气网节点6压力随热负荷增加的变化曲线

Fig. 4 Voltage of node5, the consumed power of EB and pressure of node6 plotted with the increase of heat load

J_r 、 J_R 表达了无功功率-电压之间的线性关系,所得稳定裕度会随着电压水平的变化而变化,更好地描述了耦合状态下的静态电压稳定性。与此同时, J_R 在 J_r 的基础上考虑了电力系统及其耦合系统中的控制变量对电压的影响,由仿真结果可知,所求得稳定裕度值也会更小一些,具有更低的保守性。

3.2 算例2

将上述理论进一步通过图5所示的IEEE 14-NGS20-DHS14综合能源系统验证^[4]。

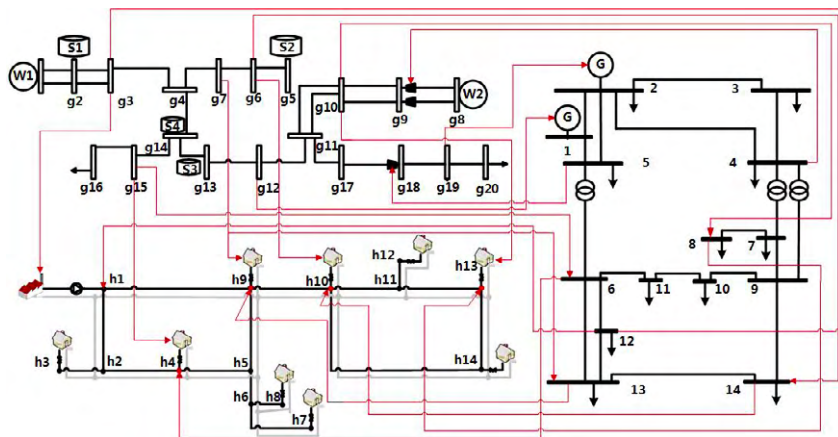


图5 14-20-14电气热综合能源系统

Fig. 5 IEEE 14-NGS20-DHS14 IES

电力网络中, 节点 1 为平衡节点, 节点 2、6、8、13、14 为 PV 节点, 无功功率上限设定为 50、24、24、24、24MW。

此综合能源系统中, 共 81 个状态变量, 对应 81 个方程, 包括: 21 个电力系统方程式(13 个有功功率方程、8 个无功功率方程); 19 个气网节点流量方程式; 15 个热网液压方程式(13 个节点热功率偏差方程式、2 个回路压力方程)及 26 个热网中用于计算供热温度和回水温度的热力方程。统一雅可比矩阵 J 为 81 阶, 降维矩阵 J_r 、 J_R 为 8 阶。根据耦合关系推导得到降维矩阵 J_r 、 J_R :

$$J_r = J_{QV} - J_{F\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{FV} \quad (38)$$

$$J_R = \{I - J_{F\theta} J_{P\theta}^{-1} [M_{P \rightarrow Q} - M_1 M_{f \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q} - M_4 M_{T^r \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q} - (M_2 + M_3 M_{T^s \rightarrow (\phi, \sigma)}) \cdot M_{(\phi, \sigma) \rightarrow P} M_{P \rightarrow Q}]\}^{-1} J_r \quad (39)$$

其中:

$$\begin{cases} J_{F\theta} = (I - J_{P\theta}^{-1} J_{P\theta} J_{f\theta}^{-1} J_{f\theta})^{-1} J_{Q\theta} \\ J_{FV} = J_{PV} - J_{P\theta} J_{f\theta}^{-1} J_{fV} \end{cases} \quad (40)$$

算例 2 中, 由于不存在以电定热模式且工作为平衡节点的 CHP 机组, 所以统一雅可比矩阵 J 以及降维矩阵 J_r 、 J_R 中不存在子矩阵 $J_{\phi\theta}$ 、 $J_{\phi V}$; 电动压缩机的存在使 $J_{P\theta}$ 矩阵不为 0, 即电-气耦合过程为能量的双向流动, 所以与算例 1 相比, $J_{F\theta}$ 、 J_{FV} 的表达式中存在子矩阵 $J_{P\theta}$, 降维矩阵 J_R 中存在 $M_{f \rightarrow P}$ 、 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 的表达与式(25)一致。现分别对 3 个矩阵指标进行求解, 得稳定裕度结果随负荷的变化如图 6 所示。

观察电力负荷的变化对静态电压稳定裕度的影响时, 本文选择 IEEE 14 系统中未与 PV 和 V0 母线直接相连的节点 10 的负荷变化作为波动。如图 6

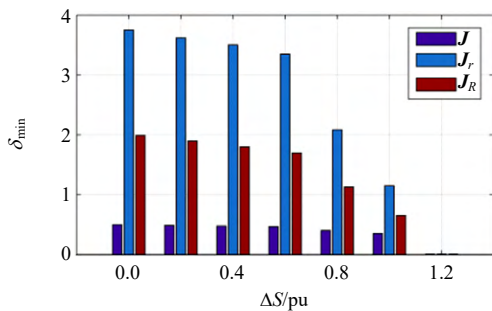


图 6 J 、 J_r 、 J_R 的最小奇异值随电力负荷增加的变化

Fig. 6 The variation of the minimum singular value of J , J_r , J_R with the increase of electric load

所示, 当 $\Delta S=0.8$ pu 时, 稳定裕度已大幅下降, 此时母线 6 和母线 14 的无功功率超出上限值, 节点类型由 PV 变为 PQ。增至 $\Delta S=1.2$ pu 时, 母线 8 和母线 13 的无功资源也被消耗, 系统静态电压稳定裕度无限接近 0, 此时图 7 所示的电压水平也大幅降低。在负荷变化的过程中, 统一雅可比矩阵 J 对应的稳定裕度变化缓慢, 直至接近静态分岔点时才突降。而降维矩阵的稳定裕度随着电压水平的降低而降低, 较好的反应了静态电压稳定性。

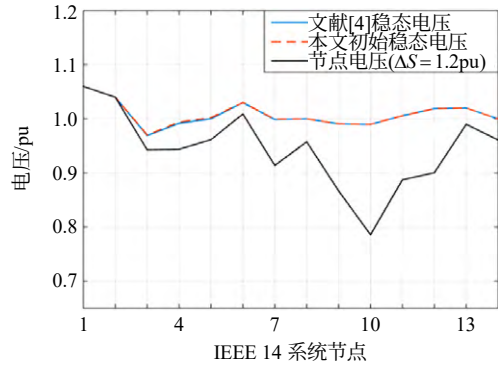


图 7 IEEE 14 系统节点电压

Fig. 7 The node voltage of 14-bus system

因为热网平衡节点处的循环泵由电网供能, 所以改变热负荷的同时, 热网平衡节点的出力和循环泵所需电功率也会发生变化。图 8 所示为降维矩阵 J_R 计算所得的稳定裕度, 当 $\Delta\phi$ 增至 50MW 时, 稳定裕度由 1.9854 降至 1.9843。此时循环泵消耗的电功率增至 0.5052MW, 与之相耦合的电力系统节点 12 的电压变化如图 9 所示。但此过程中, 统一雅可比矩阵 J 和降维矩阵 J_r 对应的稳定裕度保持在 0.0050 和 3.7473 不变。由仿真结果知: 考虑多能流控制变量对电网电压的影响所推导出的降维矩阵 J_R 对电压的变化感知程度相比 J 、 J_r 更灵敏。

仿真过程中, 3 个矩阵 J 、 J_r 、 J_R 用于描述耦合

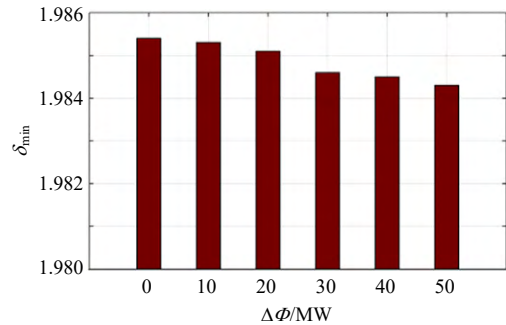


图 8 J_R 的最小奇异值随热网负荷增加的变化曲线

Fig. 8 The variation of the minimum singular value of J_R with the increase of heat load

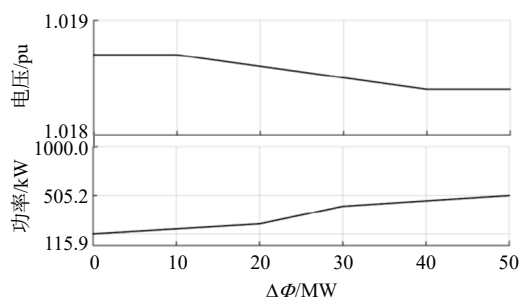


图9 节点12电压和热网平衡节点循环泵消耗功率随热网负荷增加的变化

Fig. 9 The voltage of node12 and the consumed power of pump in slack node plotted with the increase of heat load

状态下的静态电压稳定性时存在较大差异。统一雅可比矩阵 J 对应的稳定裕度 $\delta_{\min}$ 数值很小,且随着电压水平的变化并不明显,不足以作为综合能源系统中的静态电压稳定性指标。一般情况下,降维矩阵 J_r 、 J_R 所得稳定裕度均会随着电压水平的变化而变化。不过由图8和图9可知,当电压水平变化微弱时,降维矩阵 J_R 相比 J_r 变化更灵敏。

表3进一步给出了求解上述2个综合能源系统稳定裕度时,负荷水平变化过程中所对应的计算时间范围以及推得降维矩阵 J_r 、 J_R 所需的乘法运算次数。由结果知, J_R 的计算复杂程度明显高于 J_r 。

表3 J_r 与 J_R 的计算复杂度比较

Tab. 3 Computational complexity comparison between J_r and J_R

参数	算例1		算例2	
	J_r	J_R	J_r	J_R
计算时间/s	0.036~0.115	0.077~0.186	0.133~0.266	0.241~0.414
乘法运算次数	7828	15406	93570	162496

4 结论

为确保综合能源系统中电压的稳定性情况,掌握系统当前运行点与电压崩溃点的接近程度,本文研究了面向综合能源系统的静态电压稳定性分析方法。通过算例分析,得到如下结论:

1) 基于多能流统一求解模型,对统一雅可比矩阵进行奇异值分解,所得到的稳定裕度可用于判断系统当前是否存在稳定平衡点。但不能确定是否由电压稳定性问题造成。

2) 利用降维矩阵求得的稳定裕度指标可有效反应当前状态下系统电压的稳定程度,且该指标会随着电压水平的变化而变化,更好地反映了静态电压稳定性。

3) 降维矩阵 J_r 表达无功功率与电压之间的关

系时,无功功率注入的变化即包括了自身波动,又包括了耦合网络状态变量变化导致的无功功率波动。当 J_r 奇异时,统一雅可比矩阵 J 奇异,即综合能源系统失稳。因此, J_r 矩阵物理意义明确且计算简便,可用于指示综合能源系统中的静态电压稳定性问题。

4) 降维矩阵 J_R 在 J_r 的基础上,考虑了多能流控制变量对电压的影响,所得稳定裕度具有更低的保守性,对于电压变化的感知也更灵敏,但该矩阵的计算也更为复杂。

本文所提方法及指标可用于电-气-热各能源载体耦合前的研究规划,及耦合后电力系统电压运行稳定性变化情况的判断,还可量化系统当前运行点距电压崩溃点的接近程度或比较不同工况下综合能源系统电压的静态稳定裕度,从而供调度人员选择安全稳定的运行模式。

参考文献

- [1] 孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 176-194.
Sun Qiuye, Teng Fei, Zhang Huaguang. Energy internet and its key control issues[J]. Acta automatica sinica, 2017, 43(2): 176-194(in Chinese).
- [2] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306(in Chinese).
- [3] Liu X. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff Univ., Cardiff, Wales, 2013.
- [4] 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.
- [5] 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): 2942-2951.
Wang Yingrui, Zeng Bo, Guo Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2951(in Chinese).
- [6] 孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 等. 狭义能源互联网优化控制框架及实现[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4571-4580.
Sun Qiuye, Wang Bingyu, Huang Bonan, et al. The

- optimization control and implementation for the special energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4571-4580(in Chinese).
- [7] Pan Zhaoguang, Guo Qinglai, Sun Hongbin. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. Applied Energy, 2016, 167: 230-243.
- [8] 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): 1293-1305.
Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1293-1305(in Chinese).
- [9] 骆柏锋, 穆云飞, 赵波, 等. 基于统一潮流模型的电-气耦合综合能源系统静态灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 29-35.
Luo Bofeng, Mu Yunfei, Zhao Bo, et al. Static sensitivity analysis of integrated electricity and gas system based on unified power flow model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 29-35(in Chinese).
- [10] Sun Qiuye, Zhang ning, You Shi, et al. The dual control with consideration of security operation and economic efficiency for energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, DOI: 10.1109/TSG.2019.2893285.
- [11] Liu W, Li P, Yang W, et al. Optimal energy flow for integrated energy systems considering gas transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems. to be published. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2929685.
- [12] Yu J, Guo L, Mengnan Ma, et al. Risk assessment of integrated electrical, natural gas and district heating systems considering solar thermal CHP plants and electric boilers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 103: 277-287.
- [13] Lof P A, Andersson G, Hill D J. Voltage stability indices for stressed power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 326-335.
- [14] Venikov V A, Stroeve V A, Idelchick V I, et al. Estimation of electrical power system steady-state stability in load flow calculations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(3): 1034-1041.
- [15] 徐志友, 栾兆文. 电压静态稳定性分析及对策[J]. 电力系统自动化, 1994, (06): 30-35.
Xu Zhiyou, Luan Zhaowen. The Analysis and countermeasure for voltage static stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, (06) 30-35(in Chinese).
- [16] Golub G H, Van C F. Loan matrix computations, north oxford academic[M]. Oxford, 1983.
- [17] Wang R, Sun Q, Ma D, et al. The small-signal stability analysis of the droop-controlled converter in electromagnetic timescale[J]. IEEE Trans. Sustain. Energy, DOI: 10.1109/TSTE.2019.2894633.



黄雨佳

收稿日期：2019-06-11。

作者简介：

黄雨佳(1996), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统建模与稳定性分析、多能流计算与控制等, huangyujianeu@163.com。

(责任编辑 李泽荣)