

考虑双向耦合的电-气综合能源系统时序故障恢复方法

陈 玮, 丁 筱, 施云辉, 郭创新

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:电力系统和天然气网络通过双向耦合可以实现高可靠性运行。为解决电-气综合能源系统在发生故障后的恢复问题,提出了一种时序故障恢复方法。一方面,考虑燃气轮机和电转气设备的双向耦合特性,在恢复过程中通过调度其出力大小实现电力-天然气网络的互补共济;另一方面,考虑到恢复过程中大多设备具有时序特性,如储能电池容量、负荷大小、风光机组出力大小以及网络拓扑的变化,建立了一个多时序的故障恢复混合整数规划模型,并通过分段线性化的手段将模型处理得易于求解,从而得出故障恢复过程中最优的拓扑开关操作序列。最后,通过对13节点配电网和6节点配气网的联合仿真证明了所提方法的有效性。

关键词:电-气综合能源系统;故障恢复;燃气轮机;电转气设备

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908006

0 引言

近年来,随着风、光等新能源渗透率的提高和国家、企业对于清洁能源日益增加的需求,电力网络和天然气网络的耦合运行的方式得到了越来越多的关注,这里称之为电-气综合能源系统^[1-3]。电力网络和天然气网络通过能量转换设备燃气轮机 GFT (Gas-Fired Turbine) 和电转气 P2G (Power-to-Gas) 设备相互耦合实现能量的双向流动,通过电、气 2 种能量形式进行互补共济,可以消纳多余的清洁能源,实现高可靠性和高经济性运行^[4-10]。此外,由于电力网络和天然气网络之间的高度耦合特性,导致天然气网络中发生的故障能够传递到电力网络,造成了潜在连锁故障的可能性。因此,为了保证电-气综合能源系统的安全运行,有必要对故障后的恢复问题进行统一考虑和控制。

对于电-气综合能源系统故障相关的研究,目前主要集中在可靠性评估、关键故障识别以及数据攻击等方面。文献[11-12]考虑电-气网双向耦合,提出了综合能源系统的供电可靠性评估算法。文献[13]从预防和校正的角度出发,提出了考虑关键故障筛选的电-气综合能源系统混合控制方法。文献[14]提出了遭受恶意攻击下的电-气综合能源系统鲁棒防御策略。

目前的研究主要集中在故障预防阶段,对于发生事故后的恢复问题研究较少。文献[15]提出了电-气综合能源系统恢复力分析方法,结果表明电网

和气网耦合运行具有更强的恢复力,但是没有涉及详细的故障恢复流程。一个可行的故障恢复方案应该包含各个设备以及网络拓扑的时序操作流程,尤其对于高度耦合的电-气综合能源系统而言,开关设备、能量转换设备众多,更需要详细的恢复操作步骤。传统的电力网络故障恢复是一个非线性、非凸的混合整数规划问题,难以直接求解^[16-17]。针对此,已有的研究大多用启发式算法和智能算法求解配电网故障恢复问题,如粒子群优化算法^[18]、遗传算法^[19]、专家库系统^[20]等。对于故障恢复的时序过程,文献[21]通过评估故障恢复过程中的不确定性风险,得到了最优的恢复策略。文献[22]基于改进的禁忌搜索算法,提出了一种故障恢复过程中开关操作顺序生成的方法。但就电-气综合能源系统故障恢复方法而言,目前已有的研究相对较少。电-气综合能源系统高度耦合,在故障后如何对系统各设备进行协调优化是提高系统可靠性的关键。因此,电-气综合能源系统的故障恢复是亟待解决的问题。

基于以上背景,本文提出考虑双向耦合的电-气综合能源系统时序故障恢复方法,通过协同调度电-气综合能源系统中的分布式能源、储能、能量转换设备以及线路开关设备的各时段状态,实现全过程的、时序的故障恢复策略;并将所提故障恢复方法转化为一个混合整数规划问题,利用配电网线性 distflow 潮流方程和分段线性化技术手段,将其处理成易于求解的模型。最后通过算例验证了本文所提方法的有效性。

本文主要贡献总结如下:

(1) 将电-气综合能源系统故障恢复问题建模为一个多时段的混合整数优化模型,考虑多种设备的时序特性,包括储能/气设备、线路开关设备以及分布式能源;

(2) 考虑 GFT 和 P2G 的双向耦合特性,实现了电

收稿日期:2019-03-20; **修回日期:**2019-06-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900100);国家自然科学基金资助项目(51877190)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0900100) and the National Natural Science Foundation of China(51877190)

力网络和天然气网络的协同故障恢复,提高了系统的可靠性;

(3)通过线性化处理,将电-气综合能源系统故障恢复优化模型转换为一个混合整数线性规划问题,可以通过成熟的商业求解器进行求解。

1 电-气综合能源系统恢复框架

为了强调本文所提时序故障恢复的重要性,首先分析系统遭受故障后所处的若干状态。传统的故障恢复的研究大多着眼于两状态故障恢复流程,如图 1(a)所示,即故障前的状态和实现故障恢复后的状态。而在综合能源系统中,由于系统间耦合紧密,两状态故障恢复流程可能会导致恢复过程中的运行越限。为此,本文将三状态故障恢复分析流程应用于电-气综合能源系统的故障恢复研究,如图 1(b)所示,对故障转移状态进行重点分析,即拓扑结构和设备在故障恢复全过程中的状态。

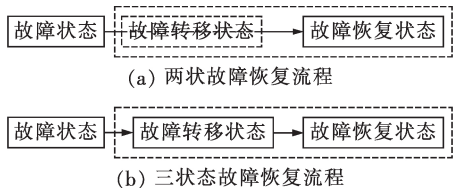


图 1 故障恢复分析流程

Fig.1 Flowchart of analysis method for fault restoration

其次分析电-气综合能源系统的结构,如图 2 所示,电力网络通过 GFT 和 P2G 装置与天然气网络实现双向耦合。电-气综合能源管理系统可以对远程终端单元(RTU)进行信息采集和远程调度指令的下

达,通过调度 GFT 和 P2G 等设备实现系统的安全经济运行。

故障恢复功能可集成在电-气综合能源管理系统中,在发生大面积停电事故(如地震、台风等恶劣自然灾害)后,上一级输电、气系统不能为配电、气系统供能,同时配电网络和配气网络也遭受到一定的故障。调度中心通过控制电力系统中的远程可控开关、分布式能源以及天然气网络中管道阀门的开关顺序,使得故障后的停电、停气区域能快速恢复供电、供气。GFT 可消耗天然气输送功率供给电力网络;反之,P2G 可以供给天然气网络。通过 2 种手段的结合,实现故障恢复量最大的目的,其流程见图 3。

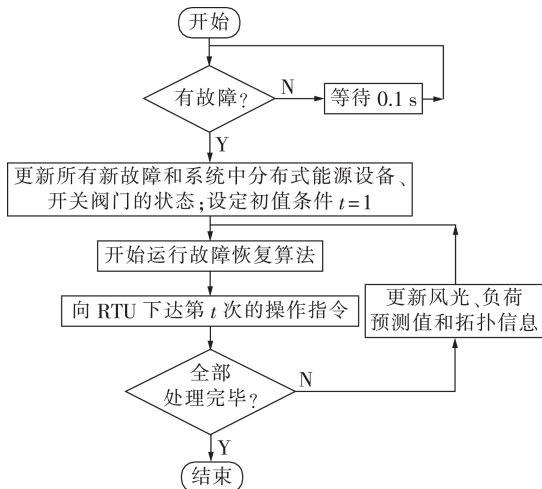


图 3 电-气综合能源管理系统故障恢复流程图

Fig.3 Flowchart of restoration in electricity-gas integrated energy system

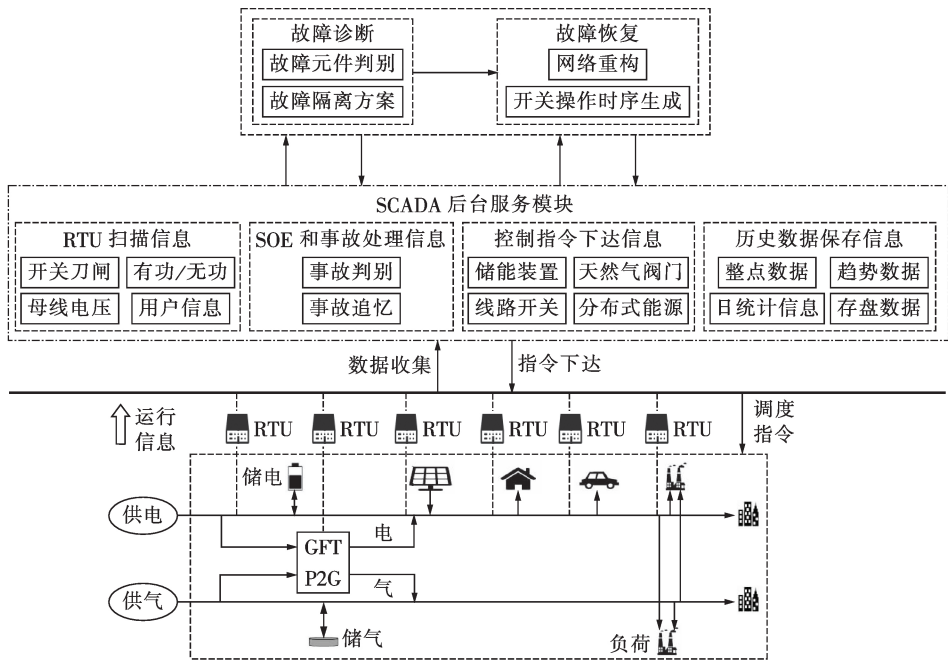


图 2 电-气综合能源管理系统架构图

Fig.2 Architecture of energy management system of electricity-gas integrated energy system

2 综合能源系统时序故障恢复的数学模型

本节将对电力潮流、天然气潮流和分布式能源设备等进行数学建模以及对时序故障恢复中的网络拓扑约束进行线性化处理。为了简化故障恢复的建模以及保证问题求解的可行性,本文首先进行如下假设:

(1)电力网络和天然气网络保持辐射状运行,其中的风机、光伏和储能设备潮流双向流动;

(2)上级网络不能对配电、气网进行供能,需要进行本地故障恢复,假设系统能在故障修复前支撑孤岛运行;

(3)通信自动化设备在故障期间保持正常工作。

故障恢复的目标为使得中断负荷最大恢复,包括电、气负荷,转化为数学规划模型具有如下的数学形式:

$$\begin{cases} \max \sum_i \sum_t \beta_i^L \Delta t P_{i,t}^D + \sum_n \sum_t \beta_n^L \Delta t F_{n,t}^D \\ i \in \Omega_e, n \in \Omega_g, t \in T \\ \text{s.t.} \quad (1) \text{电力系统运行约束} \\ (2) \text{天然气系统运行约束} \\ (3) \text{耦合元件约束} \\ (4) \text{时序拓扑约束} \end{cases} \quad (1)$$

其中,电负荷 $P_{i,t}^D$ 和气负荷 $F_{n,t}^D$ 分别乘以系数 β_i^L 和 β_n^L ,用以区分不同负荷节点的重要程度; Δt 为每一步骤所需的时间,用于开合线路开关和调度设备,这里统一取 1 h;下标 t, i 分别表示时刻和节点; T 为属于故障恢复过程的时刻集合; Ω_e, Ω_g 分别为电力网络、天然气网络节点集合。

上述数学模型为混合整数非线性规划问题,本文会将其中的非线性项都处理为易求解的线性项。下文会分别叙述各约束以及处理方法。

2.1 电力系统运行约束

线性 distflow 方程^[23]在辐射状配电网和微网系统潮流分析中得到了广泛应用,由于忽略了原有潮流方程中的非线性项,使得该方程的求解相对容易。本文基于该方程引入线路开关状态变量,得到如下所示的潮流约束。

(1)节点平衡约束。

$$\sum_{ki \in \Omega_1^{\text{ele}}} P_{ki,t} + P_{i,t}^{\text{dg}} - \sum_{ij \in \Omega_1^{\text{ele}}} P_{ij,t} = v_{i,t} P_{i,t}^D \quad \forall i \in \Omega_e, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{ki \in \Omega_1^{\text{ele}}} Q_{ki,t} + Q_{i,t}^{\text{dg}} - \sum_{ij \in \Omega_1^{\text{ele}}} Q_{ij,t} = v_{i,t} Q_{i,t}^D \quad \forall i \in \Omega_e, t \in T \quad (3)$$

其中, $P_{ki,t}$ 为线路 (k, i) 在时刻 t 流过的有功功率, k, i 分别为线路的首、末节点编号; $P_{ij,t}$ 为线路 (i, j) 在时刻 t 流过的有功功率, i, j 分别为线路的首、末节点编号; $P_{i,t}^{\text{dg}}$ 为节点 i 在时刻 t 的分布式发电有功功率; $v_{i,t}$ 为二进制变量, $v_{i,t} = 1$ 表示节点 i 恢复供电, $v_{i,t} = 0$ 表

示节点 i 未恢复供电; Ω_1^{ele} 为电力线路集合。式(3)为对应的无功功率平衡约束,其各参数定义参考式(2)。

(2)线路潮流约束。

$$V_{i,t} - V_{j,t} = 2(P_{ij,t} R_{ij} + Q_{ij,t} X_{ij}) + b_{ij,t} \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{ele}}, t \in T \quad (4)$$

$$(x_{ij,t} - 1)V_0 \leq b_{ij,t} \leq (1 - x_{ij,t})V_0 \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{ele}}, t \in T \quad (5)$$

其中,式(4)表示线路两端的电压降和潮流之间的关系; $V_{i,t}$ 为节点 i 在时刻 t 的电压; R_{ij}, X_{ij} 分别为线路 (i, j) 的电阻和电抗值; $x_{ij,t}$ 为线路 (i, j) 在时刻 t 的开合状态; V_0 为系统运行的基准电压; $b_{ij,t}$ 为引入的辅助变量,当线路状态为闭合时,其对应的线路状态变量 $x_{ij,t} = 1$,由式(5)可得 $b_{ij,t} = 0$,即电压潮流约束式(4)成立,反之,若线路断开,则 $x_{ij,t} = 0$,即电压潮流约束式(4)可由任意的 $b_{ij,t} \in [-V_0, V_0]$ 成立。

(3)线路安全约束。

$$-P_{ij}^{\max} x_{ij,t} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij}^{\max} x_{ij,t} \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{ele}}, t \in T \quad (6)$$

$$-Q_{ij}^{\max} x_{ij,t} \leq Q_{ij,t} \leq Q_{ij}^{\max} x_{ij,t} \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{ele}}, t \in T \quad (7)$$

其中, $P_{ij}^{\max}$ 为线路的有功传输上限,正负号表示双向潮流。当线路状态为闭合时,其对应的线路状态变量 $x_{ij,t} = 1$,线路安全约束成立;反之,则有 $x_{ij,t} = 0$,线路潮流为0。式(7)为对应的无功约束。

(4)电压约束。

$$V^{\min} \leq V_{i,t} \leq V^{\max} \quad \forall i \in \Omega_e, t \in T \quad (8)$$

其中, $V^{\max}, V^{\min}$ 分别为节点电压的上、下限,本文分别取为 1.1、0.9 p.u.。

(5)储能约束。

储能设备能有效减少风光机组出力波动性的问题,在故障恢复过程中也具有时序性约束的特点。

$$0 \leq P_{\text{ess},t}^c \leq \alpha_c P_{\text{ess}}^{\max} \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$0 \leq P_{\text{ess},t}^d \leq \alpha_d P_{\text{ess}}^{\max} \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$\alpha_c + \alpha_d \leq 1, \alpha_c, \alpha_d \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$\varphi_{\min} \leq \varphi_t^{\text{ess}} \leq \varphi_{\max} \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$\varphi_t^{\text{ess}} = \varphi_{t-1}^{\text{ess}} + \eta_c^{-1} P_{\text{ess},t-1}^c \Delta t - \eta_d P_{\text{ess},t-1}^d \Delta t \quad \forall t \in T \quad (13)$$

其中, α_c, α_d 分别为储能设备充、放电二进制状态变量, $\alpha_c = 1, \alpha_d = 1$ 分别表示储能设备处于充、放电状态; $P_{\text{ess},t}^c, P_{\text{ess},t}^d$ 分别为储能设备在时刻 t 的充、放电功率; $P_{\text{ess}}^{\max}$ 为储能设备的最大有功容量; φ_t^{ess} 为储能电池在时刻 t 的荷电状态; η_c, η_d 分别为储能设备的充、放电效率。这里为了研究的方便,假设充、放电效率不受充放电功率大小影响,且均取为 0.9;假设储能设备有足够的无功补偿容量。

2.2 天然气系统运行约束

为了简化计算起见,本文采用稳态天然气潮流方程^[24-26],即忽略管存和压力的动态特性。同时假设为辐射状运行,天然气系统运行约束包括以下4项。

(1)节点平衡约束。

$$\sum_{ki \in \Omega_1^{\text{gas}}} F_{ki,t} + F_{i,t}^{\text{P2G}} - \sum_{ij \in \Omega_1^{\text{gas}}} F_{ij,t} = y_{i,t} F_{i,t}^{\text{D}} + F_{i,t}^{\text{GFT}} \quad \forall i \in \Omega_g, t \in T \quad (14)$$

其中, $F_{ki,t}$ 为天然气管道 (k,i) 在时刻 t 的流量; $F_{ij,t}$ 为天然气管道 (i,j) 在时刻 t 的流量; $F_{i,t}^{\text{P2G}}$ 为节点 i 在时刻 t 的 P2G 设备天然气产出量; $F_{i,t}^{\text{D}}$ 为节点 i 在时刻 t 的负荷大小; $F_{i,t}^{\text{GFT}}$ 为节点 i 在时刻 t 的 GFT 设备天然气消耗量; Ω_1^{gas} 为天然气网络管道集合; $y_{i,t}$ 为二进制变量, $y_{i,t}=1$ 表示天然气网络节点 i 恢复供气, $y_{i,t}=0$ 表示天然气网络节点 i 未恢复供气。

(2)管道潮流约束。

根据文献[25],天然气管道分为含压缩机管道和不含压缩机管道2种,本文同时考虑2种管道的建模。

对于含压缩机的管道有:

$$\pi_{i,t} \leq \pi_{j,t} \leq \lambda_{ij} \pi_{i,t} \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{gas}}, t \in T \quad (15)$$

$$0 \leq F_{ij,t} \leq F_{ij,t}^{\text{max}} x_{ij,t} \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{gas}}, t \in T \quad (16)$$

其中, $\pi_{i,t}$ 为天然气节点 i 在时刻 t 的压力大小; λ_{ij} 为压缩机压力系数,不同的压力系数对应压缩机不同的工作状态; $x_{ij,t}$ 为管道 (i,j) 的状态变量, $x_{ij,t}=1$ 表示管道 (i,j) 供气得到恢复, $x_{ij,t}=0$ 表示管道 (i,j) 供气还未恢复。燃气式压缩机^[26]如图4所示,为简化起见忽略压缩机的能量消耗^[27]。

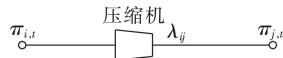


图4 燃气式压缩机

Fig.4 Gas-fired compressor

同时,对于不含压缩机的天然气管道,其潮流和节点压力有以下关系:

$$\text{sgn}_{ij,t}(\pi_{i,t}, \pi_{j,t}) F_{ij,t}^2 = \Phi^2 (\pi_{i,t}^2 - \pi_{j,t}^2) \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{gas}}, t \in T \quad (17)$$

$$\text{sgn}_{ij,t}(\pi_{i,t}, \pi_{j,t}) = \begin{cases} 1 & \pi_{i,t} > \pi_{j,t} \\ -1 & \pi_{i,t} < \pi_{j,t} \end{cases}$$

其中, Φ 为低压情况下天然气管道综合参数; $\text{sgn}_{ij,t}(\pi_{i,t}, \pi_{j,t})$ 表示管道的气流方向。由于式(17)存在平方非线性项,按照文献[27]中的方法,等式两边平方,并令 $\mu_{i,t} = \pi_{i,t}^2$, 然后引入辅助变量 δ, η , 对其进行增量分段线性化得到:

$$\text{sgn}_{ij,t}(\pi_{i,t}, \pi_{j,t}) F_{ij,t}^2 = F_{ij,t}^2 + \sum_{k=1}^{N-1} (F_{ij,t,k+1}^2 - F_{ij,t,k}^2) \delta_k = \Phi^2 (\mu_{i,t} - \mu_{j,t}) \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{gas}}, t \in T \quad (18)$$

$$F_{ij,t} = F_{ij,t,1} + \sum_{k=1}^{N-1} (F_{ij,t,k+1} - F_{ij,t,k}) \delta_k \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{gas}}, t \in T \quad (19)$$

$$\begin{cases} \delta_{k+1} \leq \eta_k \leq \delta_k & k=1,2,\dots,N-2 \\ 0 \leq \delta_k \leq 1, \eta_k \in \{0,1\} & k=1,2,\dots,N-1 \end{cases} \quad (20)$$

其中,式(18)为平方函数的分段线性化表示;式(19)为函数自变量的分段线性表示;式(20)为引入变量约束对应于分段位置和数量; k 为分段数序号; $N-1$ 为分段总数。经过以上处理,方程中的非线性项得以消除。

(3)储气设施约束。

储气设施^[13]可在系统发生故障后提供备用的天然气供应,以支撑系统短时故障恢复。与储电设备类似,建模如下:

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + (F_{i,t-1}^{\text{in}} - F_{i,t-1}^{\text{out}}) \Delta t \quad \forall i \in \Omega_g, t \in T \quad (21)$$

$$S_i^{\text{min}} \leq S_{i,t} \leq S_i^{\text{max}} \quad \forall i \in \Omega_g, t \in T \quad (22)$$

$$0 \leq F_{i,t}^{\text{in}} \leq F_{i,t}^{\text{in,max}} \quad \forall i \in \Omega_g, t \in T \quad (23)$$

$$0 \leq F_{i,t}^{\text{out}} \leq F_{i,t}^{\text{out,max}} \quad \forall i \in \Omega_g, t \in T \quad (24)$$

其中, $S_{i,t}$ 为节点 i 储气设备在时刻 t 的剩余气量; $S_i^{\text{max}}, S_i^{\text{min}}$ 分别为储气设备容量上、下限; $F_{i,t}^{\text{in}}, F_{i,t}^{\text{out}}$ 分别为时刻 t 的输入、输出流量。

(4)压力约束。

$$\pi_i^{\text{min}} \leq \pi_{i,t} \leq \pi_i^{\text{max}} \quad \forall i \in \Omega_g, t \in T \quad (25)$$

其中, $\pi_i^{\text{max}}, \pi_i^{\text{min}}$ 分别为天然气网络节点压力的上、下限。

2.3 电-气耦合约束

电-气综合能源系统通过 GFT 和 P2G 设备实现双向耦合,如图5所示。

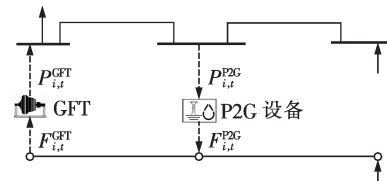


图5 电-气耦合关系示意图

Fig.5 Coupling relationship of electricity-gas network

(1)燃气机组耗气量。

$$F_{i,t}^{\text{GFT}} = \frac{P_{i,t}^{\text{GFT}}}{\eta_i^{\text{GFT}} G} \quad i \in \Omega_{\text{NGU}} \quad (26)$$

其中, $F_{i,t}^{\text{GFT}}$ 为燃气机组 i 在时刻 t 的天然气消耗量; $P_{i,t}^{\text{GFT}}$ 为燃气机组 i 在时刻 t 发出的有功功率; η_i^{GFT} 为对应的发电效率; G 为天然气的低热值,本文取为 $35\,590 \text{ kJ/m}^3$; Ω_{NGU} 为燃气机组集合。

(2)P2G装置约束。

$$F_{i,t}^{\text{P2G}} = \frac{\eta_i^{\text{P2G}} P_{i,t}^{\text{P2G}}}{G} \quad i \in \Omega_{\text{P2GU}} \quad (27)$$

其中, $F_{i,t}^{\text{P2G}}$ 为 P2G 设备 i 在时刻 t 的天然气发出量; $P_{i,t}^{\text{P2G}}$ 为消耗的有功功率; η_i^{P2G} 为对应的电解水效率; Ω_{P2GU} 为 P2G 机组集合。

2.4 拓扑约束

在恢复过程中,电力网络涉及线路开关、负荷开关、分布式能源等的操作顺序,天然气网络涉及管道阀门的操作顺序。拓扑约束保证了在每一步操作中系统都能保持辐射状拓扑运行。

(1) 线路开关约束。

拓扑变量示意图如图6所示。

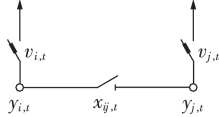


图6 拓扑变量示意图

Fig.6 Schematic diagram of topology variables

由图可见,只有当线路两端节点都为已恢复状态时,线路状态才为闭合,即有:

$$x_{ij,t} = y_{i,t} y_{j,t} \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{ele}} \cup \Omega_1^{\text{gas}}, t \in T \quad (28)$$

式(28)为2个二进制变量相乘的双线性项,不能直接利用求解器处理。为了便于求解,将其转换为等价的线性形式:

$$\begin{cases} x_{ij,t} \leq y_i & \forall ij \in \Omega_1, t \in T \\ x_{ij,t} \leq y_j & \forall ij \in \Omega_1, t \in T \\ x_{ij,t} \geq y_i + y_j - 1 & \forall ij \in \Omega_1, t \in T \end{cases} \quad (29)$$

其中, $\Omega_1 = \Omega_1^{\text{ele}} \cup \Omega_1^{\text{gas}}$ 。

(2) 电力负荷开关约束。

电力节点负荷通过负荷开关连接到馈线,可控负荷开关可以通过远程控制进行操作。只有当对应的线路节点处于带电状态时,节点负荷才能进行恢复。

$$v_{i,t} \leq y_{i,t} \quad \forall i \in \Omega_e, t \in T \quad (30)$$

(3) 操作时序约束。

在恢复过程中被恢复的元件设备不允许在后续的操作中进行断开、关闭等操作,包含以下状态变量的约束:

$$x_{ij,t} \geq x_{ij,t-1} \quad \forall ij \in \Omega_1^{\text{ele}} \cup \Omega_1^{\text{gas}}, t \in T \quad (31)$$

$$y_{i,t} \geq y_{i,t-1} \quad \forall i \in \Omega_e \cup \Omega_g, t \in T \quad (32)$$

(4) 辐射状拓扑约束。

由于本文假定电力网络和天然气网络都是辐射状运行的,所以在恢复过程中网络拓扑也要全程满足该要求,因此有:

$$\sum_{ij \in \Omega_1^{\text{ele}}} x_{ij,t} = |\Omega_e| - 1 \quad \forall t \in T \quad (33)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_1^{\text{gas}}} x_{ij,t} = |\Omega_g| - 1 \quad \forall t \in T \quad (34)$$

其中, $|\Omega_e|$ 、 $|\Omega_g|$ 分别为电力网络和天然气网络的节点数。

3 算例分析

本节采用IEEE 13节点系统^[28]和6节点天然气系统组成的电-气综合能源系统为算例,用以验证本文所提方法的有效性。仿真编程环境为MATLAB,通过YALMIP对优化模型进行建模,利用CPLEX加以求解,最终得出算例仿真结果。

算例系统拓扑如图7所示,两系统通过1台GFT和1台P2G设备实现双向耦合,为了区分,分别用字母G和E表示天然气、电力节点,括号表示线路、管道。原三相不平衡的IEEE 13节点配电网被修改为平衡网络,并以单相代替分析,线路参数如附录中的表A1所示,各节点负荷如附录中的表A2所示,并且随时间各节点负荷大小按百分比波动,如附录中的图A1所示。2台耦合设备连接关系如图7所示,具体参数见附录中的表A3。天然气网络的管道、负荷等详细参数见附录中表A4—A6,储能设备的参数见附录中表A7。假设在时刻12:00发生故障,上级网络均不能向电力网络、天然气网络供能。同时,电力网络中(E_7, E_{10})、(E_7, E_8)这2条线路断线,天然气网络中(G_1, G_3)管道断线。为了进行短时支撑性供能,需要对电-气综合能源系统进行本地恢复供能。为此,首先设计3种场景进行仿真,以对比验证本文所提方法的有效性。

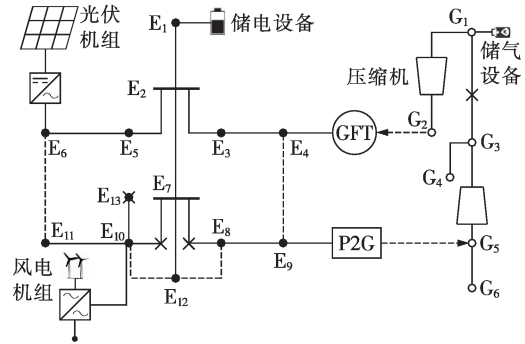


图7 13-6节点电-气综合能源系统

Fig.7 Topology of 13-6-node electricity-gas integrated energy system

(1) 场景1: 不考虑耦合,电力网络和天然气网络独立进行故障恢复。

(2) 场景2: 只考虑GFT耦合,电-气综合能源系统进行故障恢复。

(3) 场景3: 采用本文所提方法,同时考虑GFT和P2G耦合,电-气综合能源系统进行故障恢复。

首先对比3种场景的目标函数,即电、气总负荷恢复量的加权值,结果如表1所示。由表可见,场景1—3的目标函数依次递增,计算时间都在1s左右。对于场景1,由于没有考虑电-气耦合,在恢复过程中储气设备中多余的天然气不能转换为电能,并且由于下游的天然气管道故障,无法对下游的气负荷

点进行恢复。所以在电、气负荷两方面恢复量都较低,约为场景3目标函数的55.94%。对于只考虑了GFT耦合的场景2,多余的天然气可以转换为电能,使得该场景下电负荷的恢复量较场景1高。但是天然气下游的故障区域不能进行恢复,所以在场景1、2下,天然气恢复量的值相同。场景2的目标函数约为场景3下的66.64%,但是由于没有对天然气负荷进行恢复,导致电负荷部分高出场景3。在场景3下,由于P2G设备的存在,光伏、风机发出的额外电量可转换为天然气,从而进一步对气负荷进行恢复。所以在所有的场景中,场景3的目标函数值最大,为41488.12,即恢复了最多的电、气负荷,这说明了本文所提双向耦合故障恢复方法的有效性。

表1 不同场景的目标函数值

Table 1 Values of objective function in three different cases

场景	目标函数值	电负荷恢复量	气负荷恢复量	计算时间/s
1	23206.61	18558.16	4648.45	0.912
2	37258.05	32609.60	4648.45	0.956
3	41488.12	22918.32	18569.80	1.125

其次,详细分析每种场景下的恢复过程和网络拓扑结构的变化。3种场景下线路开关和负荷恢复的情况如图8所示,对应的网络拓扑变化过程中所示。由图8可见,在每一步的恢复过程中,都需要满足式(1)中的所有约束。场景3相较于场景1和场景2,分别额外恢复6个负荷点(电负荷点 E_4 、 E_9 以及气负荷点 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6)和4个负荷点(气负荷点 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6)。

在场景1中,由于没有额外的天然气注入,导致电力网络中的负荷完全由储能电池和风、光机组承担,所以优先恢复了位于节点 E_6 、 E_{10} 两处的光伏和风电机组,并且通过闭合联络线路(E_6 , E_{11})、(E_{12} , E_8)恢复了下游负荷点 E_8 、 E_{12} 。

在场景2中,由于节点 E_4 处GFT的存在,其发出的电力支撑了电力网络的恢复。通过闭合联络线路(E_4 , E_9),下游的节点 E_9 、 E_8 的负荷得到恢复。同时由于节点 E_4 本地的电力注入,减少了节点 E_1 处储能电池的功率输出,使得节点 E_7 的负荷也得到了恢复。最后加上节点 E_6 、 E_{10} 两处的分布式清洁能源的发电出力,在场景2下,所有的电负荷都得到了恢复。

在场景3的恢复过程中,由于可以通过节点 E_9 处的P2G设备将电力转换成天然气,所以可对天然气负荷进行恢复。在恢复路径上包含了节点 E_6 、 E_{10} 处的分布式能源,从而使得其发出的电力可以通过P2G设备转换成天然气。但是由于此恢复路径较长,过高的负荷会导致节点电压越界,所以节点 E_5 、 E_7 处的电负荷没有得到恢复。整体上,虽然场景3下电负荷恢复量较场景2少,但是由于额外恢复的

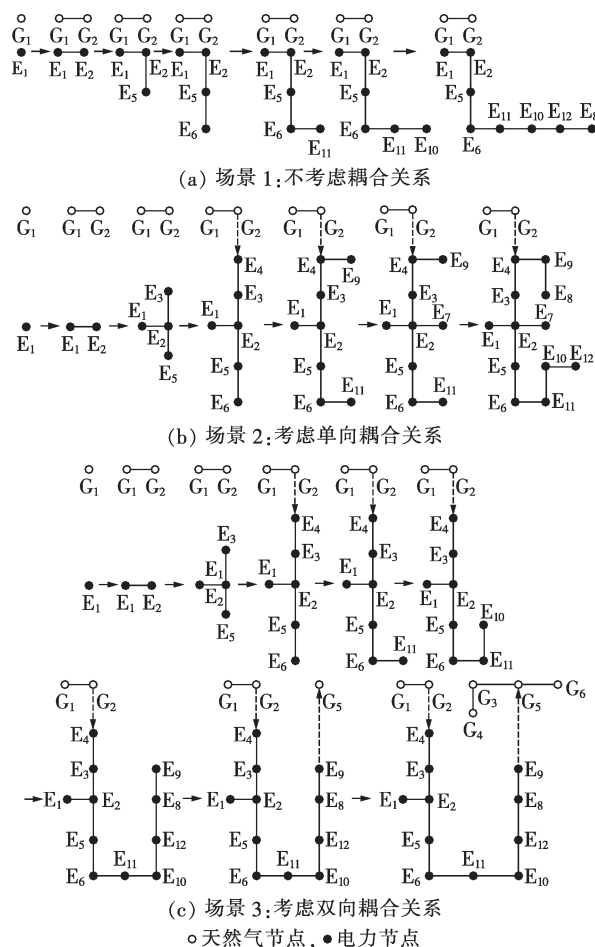


图8 3种场景下的恢复过程

Fig.8 Restoration sequence of three cases

天然气负荷较多,所以场景3的目标函数值较场景2要高。

场景3的恢复过程通过网络结构、分布式新能源机组、P2G设备的配合,实现了电力网络、天然气网络的故障恢复,同时也加强了对于分布式新能源的消纳能力。该过程体现了电-气网络互补共济,增加了供能可靠性、提高恢复能力的特点。

一旦负荷点恢复后,其大小会按照附图A1中的负荷比例曲线进行变化波动,为简化起见,这里假设每个负荷点的波动比例相同。图9对比了场景2和场景3恢复过程中每一步的电负荷恢复量,可以看出,在恢复过程的第3步和第6步中,场景2恢复

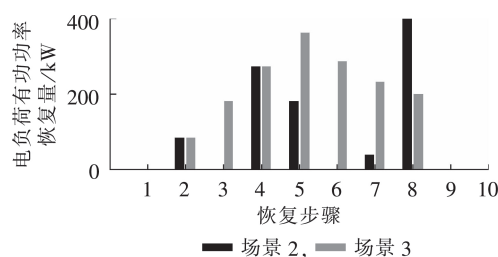
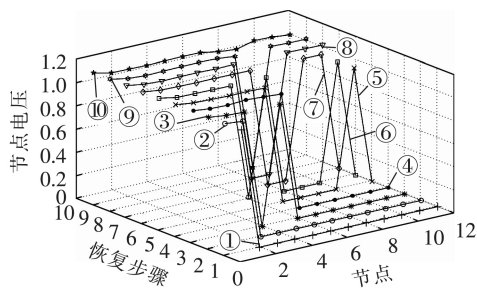


图9 恢复过程示意图

Fig.9 Schematic diagram of restoration sequence

的电负荷量分别为180 kW和285 kW,而对应的场景3下则没有对负荷进行恢复,这是由于考虑到场景3下后续步骤可对天然气网络负荷进行额外恢复而进行的取舍。

此外,在恢复过程中形成的拓扑为故障转移状态,具有脆弱性。为了说明本文所提方法能够保证故障转移状态下系统的安全运行,特别列出恢复全过程的电力网络节点电压变化曲线如图10所示,图中节点电压为标么值。节点 E_1 安装的储能电池具有黑启动的能力,工作模式设为 $v-f$,电压值设为定值1.05 p.u.。可以看出,随着恢复步骤的进行,待恢复的节点电压得到恢复,且所有已恢复的节点在故障恢复全过程内电压值均在安全运行范围内,节点电压最低值出现在步骤10中的节点9,为0.97 p.u.。



① 步骤1, ② 步骤2, ③ 步骤3, ④ 步骤4, ⑤ 步骤5
⑥ 步骤6, ⑦ 步骤7, ⑧ 步骤8, ⑨ 步骤9, ⑩ 步骤10

图10 电力网络节点电压

Fig.10 Nodal voltage of electric power network

系统中的储能设备和耦合设备在故障恢复中起到了关键作用,储能电池有功输出功率、GFT发电有功功率和P2G设备消耗的有功功率曲线图如图11所示。整体而言,随着恢复过程中拓扑和负荷大小的变化,为了维持个时段的网络运行约束,电力和天然气设备输出实时地变化。在恢复过程的第4、7步,分布式新能源风力、光伏机组并网发电,导致储能电池的输出功率降低。第3、8步分别对应于GFT、P2G设备开始恢复工作。

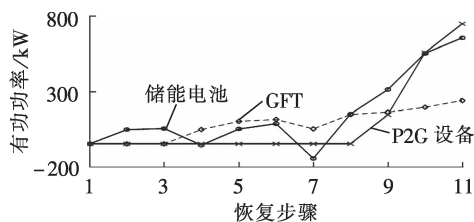


图11 电-气综合能源系统能量转换设备出力曲线

Fig.11 Output curve of energy conversion equipment in electricity-gas integrated energy system

最后,为分析对比不同线路故障下本文方法的有效性,特设置场景4作为场景3的对照组进行仿真。场景4下考虑电-气双向耦合,在上级网络供能中断的同时,故障线路设置为线路 (E_6, E_{11}) 、 (E_7, E_8) 和管道 (G_3, G_5) ,恢复结果如表2所示。由表可见,

场景4恢复的目标函数为场景3的95.75%(以场景3下目标函数的100%为参考值),可知故障位置对于恢复结果有一定影响,但是本文所提方法能保证一定程度的鲁棒性,即能针对不同故障进行有效恢复。图12为场景4下的恢复过程示意图。

表2 不同故障下的恢复结果

Table 2 Results of restoration in different fault cases

场景	故障位置	目标函数	恢复百分比 / %	恢复供电的节点	恢复供气的节点
3	$(E_7, E_{10}), (E_7, E_8), (G_1, G_3)$	41 488.12	100	$E_2, E_4, E_6, E_8, E_9, E_{11}, E_{12}$	$G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6$
4	$(E_6, E_{11}), (E_7, E_8), (G_3, G_5)$	39 723.31	95.75	$E_2, E_4, E_6, E_8, E_{11}$	G_1, G_2, G_3, G_5, G_6

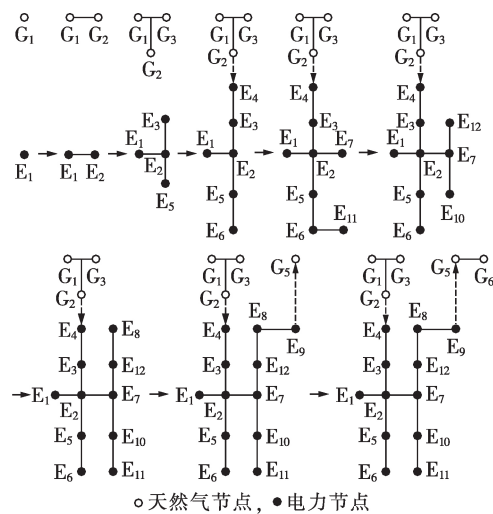


图12 场景4恢复过程示意图

Fig.12 Schematic diagram of restoration sequence in Case 4

4 结论

已有的电-气综合能源系统故障相关的研究大多集中于故障预防和故障恢复力评估等方面,本文从发生故障后的角度出发,提出了考虑双向耦合的电-气综合能源系统时序故障恢复方法。一方面,利用双向耦合设备提高了综合能源系统的故障恢复量;另一方面,揭示了故障转移状态中的每一步操作流程,保证了故障恢复全过程的安全运行。

在本文基础上,后续工作可以着眼于精细化天然气网建模、供热网耦合、不确定因素处理等方面的内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

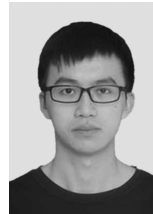
参考文献:

- [1] 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 Binyin, 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.
- [2] 窦迅,赵文浩,郎伊紫禾,等. 计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述[J]. 电网技术,2019,43(1):165-173.
DOU Xun, ZHAO Wenhao, LANG Yizihe, et al. Review of operation of natural gas-electricity coupling system considering power-to-gas technology[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 165-173.
- [3] 杨自娟,高赐威,赵明,等. 电力-天然气网络耦合系统研究综述[J]. 电力系统自动化,2018,42(16):21-31,56.
YANG Zijuan, GAO Ciwei, ZHAO Ming, et al. Review of coupled system between power and natural gas network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 21-31, 56.
- [4] HE Yubin, SHAHIDEHPOUR M, LI Zhiyu, et al. Robust constrained operation of integrated electricity-natural gas system considering distributed natural gas storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1061-1071.
- [5] HE Yubin, YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [6] ZHANG Yining, HE Yubin, GUO Chuangxin, et al. Synergistic integrated electricity-natural gas system operation with demand response[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1-5.
- [7] 文云峰,瞿小斌,肖友强,等. 耦合能量枢纽多区域电-气互联能源系统分布式协同优化调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(9):22-30.
WEN Yunfeng, QU Xiaobin, XIAO Youqiang, et al. Distributed synergistic optimal dispatch of multi-regional electricity-gas integrated energy systems with energy hubs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 22-30.
- [8] 卫志农,梅建春,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):41-47.
WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47.
- [9] 张思德,胡伟,卫志农,等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(9): 121-128.
ZHANG Side, HU Wei, WEI Zhinong, et al. Stochastic optimal power flow of integrated power and gas energy system based on chance-constrained programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 121-128.
- [10] 张伊宁,何宇斌,晏鸣宇,等. 计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):1-10.
ZHANG Yining, HE Yubin, YAN Mingyu, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-natural gas system considering demand response and dynamic natural gas flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 1-10.
- [11] 陈娟伟,余涛,许悦,等. 气电耦合综合能源系统供电可靠性评估解析算法[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):59-69.
CHEN Juanwei, YU Tao, XU Yue, et al. Analytic method for power supply reliability assessment of electricity-gas coupled energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 59-69.
- [12] 余娟,马梦楠,郭林,等. 含电转气的电-气互联系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):708-715.
YU Juan, MA Mengnan, GUO Lin, et al. Reliability evaluation of integrated electrical and natural-gas system with power-to-gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 708-715.
- [13] 梅建春,卫志农,张勇,等. 考虑关键故障筛选的电-气互联综合能源系统混合控制方法[J]. 电网技术,2019,43(1):23-33.
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Hybrid control of integrated power and gas energy systems based on significant contingency screening[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 23-33.
- [14] WANG Cheng, WEI Wei, WANG Jianhui, et al. Robust defense strategy for gas-electric systems against malicious attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(4): 2953-2965.
- [15] 齐世雄,王秀丽,邵成成,等. 极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力分析[J]. 电网技术,2019,43(1):41-51.
QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Resilience analysis of integrated electricity and natural gas energy system under extreme events[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 41-51.
- [16] 陈竟成,徐德超,于尔铿. 配电网故障恢复系统[J]. 电力系统自动化,2000,24(4):46-51.
CHEN Jincheng, XU Dechao, YU Erkeng. Distribution fault detection, isolation and restoration system in a distribution management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 46-51.
- [17] 吴文传,张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化,2003,27(12):50-54.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54.
- [18] 卢志刚,董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化,2006,30(24):39-43.
LU Zhigang, DONG Yuxiang. Distribution system restoration based on improved binary particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43.
- [19] 杨秀霞,张晓峰,张毅. 免疫遗传算法在舰船电力系统供电恢复中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):84-89.
YANG Xiuxia, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Yi. Study on immune genetic algorithm for ship board power system service restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 84-89.
- [20] 杨成峰,乐秀璠. 配电网故障恢复专家系统的一种实现[J]. 电力自动化设备,2001,21(11):28-31.
YANG Chengfeng, LE Xiufan. An implementation of service restoration expert system for power distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 28-31.
- [21] 周天,郝丽丽,王昊昊,等. 兼顾风险与收益的主动配电网非正常停运恢复策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):136-144.
ZHOU Tian, HAO Lili, WANG Haohao, et al. Unscheduled outage restoration strategy of active distribution network considering risk and gain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 136-144.
- [22] 刘健,石晓军,程红丽,等. 配电网大面积断电供电恢复及开关操作顺序生成[J]. 电力系统自动化,2008,32(2):76-79,83.
LIU Jian, SHI Xiaojun, CHENG Hongli, et al. Restoration for large area blackout of distribution network and switching operation

- sequence management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 76-79, 83.
- [23] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [24] 赵霞, 胡潇云, 杨仑, 等. 考虑参数不确定性的区域电-气联合系统的概率-模糊能流评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 135-142.
- ZHAO Xia, HU Xiaoyun, YANG Lun, et al. Probabilistic-possibilistic energy flow evaluation of regional electricity-gas integrated system considering parameter uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 135-142.
- [25] 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.
- [26] 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): 31-40.
- 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): 31-40.
- [27] 胡源, 别朝红, 李更丰, 等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 45-54.
- HU Yuan, BIE Zhaohong, LI Gengfeng, et al. Integrated planning of natural gas network and composite power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 45-54.
- [28] IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group. 13-bus feeder[EB/OL]. [2019-06-02]. <http://sites.ieee.org/peste-test-feeders/resources/>.

作者简介:



陈 伟

陈 伟(1994—),男,四川南充人,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统故障恢复及优化运行(E-mail: chenwei_ee@zju.edu.cn);

丁 筱(1997—),女,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化运行(E-mail: 401051634@qq.com);

施云辉(1994—),男,浙江金华人,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化运行(E-mail: 385199092@qq.com);

郭创新(1969—),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要研究方向为能源互联网运行与规划和风险调度(E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn)。

Sequential fault restoration method for electricity-gas integrated energy system considering two-way coupling

CHEN Wei, DIN Xiao, SHI Yunhui, GUO Chuangxin

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Power system and natural gas networks can achieve high reliability operation through two-way coupling. In order to solve the recovery problem of electricity-gas integrated energy system after failure, a sequential fault restoration method is proposed. On the one hand, considering the two-way coupling characteristics of gas turbines and P2G(Power-to-Gas) equipment, the complementary mutual aid of the electricity-gas network is realized by scheduling the output of the gas turbine and P2G equipment during the recovery process. On the other hand, considering the sequential characteristics of most devices in the recovery process, such as the capacity of energy storage battery, load consumption, wind turbine output and network topology change, a mixed integer programming model with multi-sequence for fault restoration is established, which is easily solved by piecewise linearization, and the optimal sequence of topology switch operations in the fault restoration process is obtained. Finally, the effectiveness of the proposed method is proved by the joint simulation of 13-bus power distribution network and 6-node gas distribution network.

Key words: electricity-gas integrated energy system; fault restoration; gas turbine; power-to-gas equipment

附录

表 A1 配电网线路参数
Table A1 Lines parameters of distribution network

线路编号	首节点	末节点	长度/m	容量/ (kV · A)
1	1	2	609.6	1500
2	2	3	152.4	1000
3	3	4	60.96	500
4	2	5	152.4	1000
5	5	6	91.44	800
6	2	7	609.6	1500
7	7	8	3.048	800
8	8	9	152.4	800
9	7	10	91.44	800
10	10	11	91.44	800
11	10	12	91.44	800
12	7	12	304.8	1500
13	6	11	609.6	800
14	8	12	457.2	1000
15	4	9	182.88	700

表 A2 配电网负荷参数
Table A2 Load parameters of distribution network

节点编号	有功负荷/kW	无功负荷/kVar	权重系数
2	100	40	2.12
4	100	40	1.44
5	200	100	1.14
6	200	100	3.29
7	300	180	1.66
8	200	150	2.90
9	200	40	2.88
11	200	120	1.66
12	200	120	1.68
13	40	30	1.84

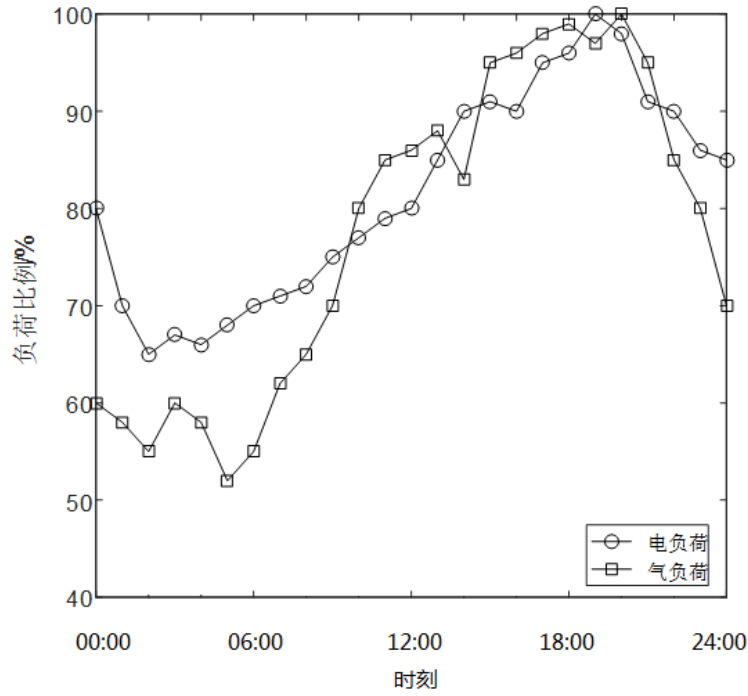


图 A1 负荷比例曲线图

Fig. A1 Load curve in one day

表 A3 耦合设备参数

Table A3 Parameters of coupling equipments

设备	电网节点	气网节点	输出功率上限/kW	输出功率下限/kW	转换效率
GFT	4	2	800	0	0.43
P2G	9	5	300	0	0.62

表 A4 天然气管道参数

Table A4 Pipelines parameters of natural gas system

线路编号	首节点	末节点	Φ
1	1	2	1.095
2	1	3	1.095
3	3	4	1.173
4	3	5	1.158
5	5	6	1.158

表 A5 天然气网络负荷参数

Table A5 Load parameters of natural gas network

节点编号	气体负荷/ ($\text{Sm}^3/\text{h}^{-1}$)	压力上限/MPa	压力下限/ MPa	权重系数
1	29.8	7.5	2	5.82
2	10.4	6.0	2	5.46
3	12.6	6.0	2	4.83
4	16.5	6.0	2	7.79
5	11.0	6.0	2	6.41
6	11.6	6.0	2	5.34

表 A6 天然气网络压缩机参数
Table A6 Compressor parameters of natural gas network

压缩机编号	首节点编号	末节点编号	加压比下限	加压比上限
1	1	2	1.0	1.3
2	5	3	1.0	1.2

表 A7 储能设备参数
Table A7 Parameters of energy storage equipments

设备	节点	储能初值	储能上限	存入速率上限	取出速率上限
储电设备	4	2500 kW · h	3000 kW · h	750 kW/h	750 kW/h
储气设备	9	800 m ³	300 m ³	100 m ³ /h	100 m ³ /h