

计及输电网和输气网双向耦合特性的 机组恢复优化决策方法

阚君¹, 许寅¹, 王颖^{1*}, 张宸赓¹, 杜洋², 郭灵瑜²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044;

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 虹口区 200437)

Optimal Decision-making Method for Generator Start-up Considering Interdependencies Between Power and Gas Transmission Networks

KAN Jun¹, XU Yin¹, WANG Ying^{1*}, ZHANG Chengeng¹, DU Yang², GUO Lingyu²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Hongkou District, Shanghai 200437, China)

ABSTRACT: With the rapid development of gas-fired units in the power transmission network (PTN) and electrification of critical facilities in the gas transmission network (GTN), the two networks are closely coupled with each other. During power system restoration, start-up of gas-fired units in PTN and restoration of electricity-driven facilities in GTN are interdependent. Firstly, dynamic characteristics and interdependencies of two systems are analyzed, clarifying the necessity of considering the interdependencies of two systems in decision-making of generator start-up. Secondly, taking into account the dynamic process of GTN and the interdependencies of two systems, maximizing the power generation capability, subject to the operation constraints, dynamic constraints, restoration logic constraints, and interdependent constraints, etc., a mixed-integer linear program of optimal decision-making for generator start-up is built. For the partial differential equation (PDE) constraints describing dynamic characteristics of the GTN, finite difference method is adopted to transform them into linear algebra ones. New England 10-machine 39-bus system and Belgium gas transmission system are used to compose a coupling system. The effectiveness and superiority of the proposed method are verified in case studies.

KEY WORDS: generator start-up; power transmission network; gas transmission network; natural gas dynamic process; blackout

摘要: 随着输电网中燃气机组的快速发展和输气网中关键设施电气化的不断推进, 输电网和输气网耦合愈加紧密。尤其在大停电后的系统恢复期间, 输气网的运行将影响到燃气机组的恢复, 输电网的恢复将影响到关键电驱动设施的恢复, 进而影响到输气网的运行。该文首先分析输电网和输气网在大停电后恢复过程中的动态特性及双向耦合影响, 明确在机组恢复阶段考虑两网耦合的必要性; 其次, 计及输气网慢动态过程及两网双向耦合特性, 以最大化输电网发电能力为目标, 考虑两网运行约束、气网动态约束、恢复逻辑约束及双向耦合约束等, 构建输电网机组恢复优化决策的混合整数线性规划模型; 其中, 针对气网动态特性的偏微分方程 (partial differential equation, PDE) 约束, 采用有限差分方法转化为线性代数约束; 最后, 通过新英格兰 10 机 39 节点系统和比利时输气网系统构成的耦合测试系统, 验证该文方法的有效性和优越性。

关键词: 机组恢复; 输电网; 输气网; 天然气动态过程; 大停电

0 引言

近年来, 输电网和输气网的耦合程度日趋紧密。一方面, 在我国“双碳”目标和新型电力系统建设的背景下, 作为优质的过渡电源, 燃气机组比重持续增加; 另一方面, 电驱动压缩站和电驱动气源在输气网中得到广泛应用^[1]。然而, 两网的双向耦合可能加剧停电危机、影响系统恢复。如 2021 年 2 月美国得州停电事件中, 大量电驱动的天然气生产和输

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助 (5400-202117142A-0-0-00); 国家自然科学基金(青年科学基金)项目 (52107067); 国网上海市电力公司项目 (52094021N006)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5400-202117142A-0-0-00); National Natural Science Foundation of China (52107067); The Project of Shanghai Electric Power Research Institute, State Grid Corporation of China (52094021N006)。

送设备停运, 引发天然气供应不足和管道失压, 影响燃气机组运行, 产生恶性循环^[2-3]。系统恢复初期, 输气网的运行将影响到燃气机组的启动, 且输气网中关键电驱动设施的恢复亦影响到输气网的运行。因此, 机组恢复策略制定时需要充分考虑两网双向耦合特性, 确保策略的有效性和最优性。

机组恢复阶段需要决策机组和路径的启动或恢复时序。目前, 传统机组恢复优化决策方面已有大量研究^[4-5]。随着电网和天然气网耦合日趋紧密, 已有学者初步开展了电网和天然气网协同恢复的研究。现有电网和天然气网协同恢复的研究多聚焦于配网或园区级综合能源系统层面, 重点关注灾后维修人员调度^[6]和重要负荷恢复^[7-10]。考虑输电网和输气网层面耦合的恢复方法较少, 但现有成果也颇具借鉴意义。文献[11]研究了电-气混联综合能源系统在极端事件下的恢复力问题, 并通过蒙特卡洛模拟和马尔科夫状态转移对遭受不同类型自然灾害时系统恢复力进行了计算, 结果表明, 输电网和输气网耦合运行具有更强的恢复力, 但未涉及具体的恢复策略; 文献[12]首先提出了评估输电-输气耦合系统功能的韧性指标, 构建了骨干网架重构模型以识别耦合系统中的关键设备, 在此基础上, 将关键设备恢复次序决策问题建立为混合整数线性规划模型, 并分析了恢复资源、维修人员和维修模式对恢复进程的影响, 但未考虑输气网慢动态特性和机组启动过程。

综上, 现有的恢复方面研究成果初步考虑了电网和天然气网耦合影响, 对本文的研究具有借鉴意义, 但仍存在以下问题尚待解决: 1) 大停电后, 输气网中关键电驱动设施的供电恢复影响输气网运行, 而输气网运行又影响燃气机组的恢复, 目前少有考虑此类双向耦合特性的机组恢复研究; 2) 此外, 机组恢复需决策各个元件的恢复时序, 而输气网的时间常数大, 对元件恢复时序影响大, 因此决策时输气网的慢动态特性不容忽视。

1 机组恢复理念与模型框架

1.1 机组恢复理念

本文的研究对象为与输气网通过燃气机组、电驱动压缩站和电驱动气源实现双向耦合的输电网。假设极端事件引发大停电后, 电驱动压缩站和电驱动气源停运, 输气管网供气能力受限、气压下降, 影响燃气机组的恢复。

输电网恢复过程中, 燃气机组的恢复和输气网电驱动设施的供电恢复具有相互依赖关系。若未及时恢复输气网电驱动设施的供电, 则可能导致燃气机组因天然气断供而推迟启动, 延缓系统恢复进程, 加重停电损失。合理的机组恢复时序和输气网电驱动设施的供电恢复时序可以快速恢复电网的发电能力, 加速恢复进程, 如图1所示。

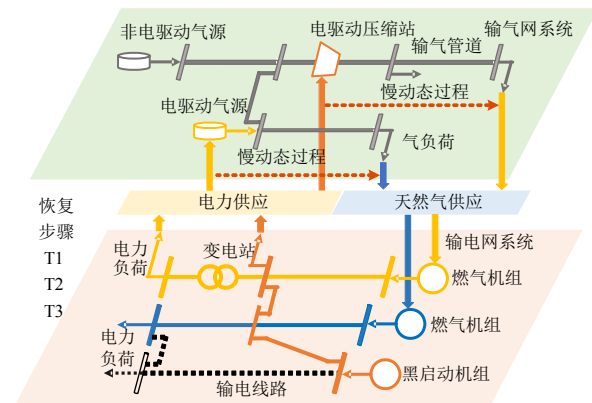


图1 考虑两网耦合特性的机组恢复过程

Fig. 1 Generator start-up process considering interdependencies of two systems

本文针对机组恢复问题, 以最大化输电网发电能力为目标, 统筹考虑恢复进程中的两网耦合影响和时间尺度差异, 对机组恢复阶段的机组、路径和输气网电驱动设施的恢复操作时序进行优化决策。

系统恢复初期, 发电资源有限, 且燃气机组恢复和电驱动设施供电恢复相互制约, 需重点考虑如何协调非黑启动机组的启动和输气网电驱动设施的供电恢复。另外, 相比于输电网, 输气网具有慢动态响应特性。从电驱动设施的恢复到燃气机组供气节点气压的恢复是一个缓慢的过程, 与天然气流动动态特性和管网特性密切相关。天然气系统能流动态分布规律由偏微分方程 (partial differential equation, PDE) 描述, 如何在优化问题中考虑 PDE 约束是有待解决的难题。

1.2 机组恢复模型框架

本文将整个系统恢复进程分为 T 个时段, 每个时段长度为 Δt , 所有恢复时段构成的集合为 S_T 。模型求解结果为输电网各个时段的恢复策略, 即机组启动、路径恢复和负荷恢复状态。

1.2.1 目标函数

目标函数设为最大化的输电网发电能力^[13], 数学表示为

$$\max \left\{ \sum_{i \in S_{NBS}} \sum_{t \in S_T} (C_i - P_i^{\text{crk}}) u_{g,i}^t \right\} \quad (1)$$

式中： $u_{e,i}^t$ 为表征机组状态的 0-1 整数决策变量，若已恢复取 1，否则取 0； C_i 为机组容量； P_i^{*k} 为机组启动功率； S_{NBS} 为系统中非黑启动机组的集合。

1.2.2 约束条件

计及两网耦合特性的机组恢复问题需要考虑的约束包括输电网约束、输气网约束以及耦合设备约束。针对机组恢复问题的输电网约束建立研究已较为成熟，主要包括机组出力函数线性化和输电网恢复约束，详见附录 A。对输气网和耦合设备建立约束是本文的研究重点，将在本文第 2 部分进行介绍。其中，描述输气管道动态的 PDE 约束转化是难点，将在本文第 3 部分进行介绍。

2 输气网与耦合设备约束建模

输气网是由气源、输气管道、压缩站及其他附属设备组成的复杂网络，通过燃气机组、电驱动压缩站和电驱动气源与输电网双向耦合。针对输气网中的主要元件和 3 类耦合设备建立约束。

2.1 输气网约束

本文考虑的输气管网设备包括输送气体的管道元件和位于管道端口的气源、压缩站和天然气负荷等边界元件，分别对管道元件和边界元件建模。

2.1.1 输气管道动态约束

天然气沿管道一维等温流动的数学模型由一组偏微分方程刻画，包括连续性方程、动量方程和状态方程^[14]。针对城市区域输气管网的特点，忽略动量方程中的对流项和重力高程差项；引入天然气质量流量 M 和流速基值 $\bar{\omega}$ ，得到一组刻画管道动态的线性偏微分方程组^[15]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial M}{A \partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{A \partial \tau} + \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \frac{\lambda M}{2DA} \bar{\omega} = 0 \quad (3)$$

$$\Pi = c^2 \rho \quad (4)$$

式中： D 为管道直径； A 为管道横截面积； λ 为管道摩擦系数； c 为天然气在管道内的声速； τ 为时间； x 为管道轴向空间距离； Π 为天然气压力； ρ 表示天然气密度。

恢复过程中，重点关注的输气系统物理量包括各恢复时段的输气节点气压和管道流量。值得说明的是，本文采用输气管道动态模型而非稳态模型，其原因在于输气网恢复过程中，从某一稳态到达下一个稳态的动态过程长(几十分钟级~小时级)，进而

决定了燃气机组具备出力条件的时间；而稳态模型仅描述稳态时管道流量与两端气压之间的关系，无法刻画恢复过程中管网状态的变化过程。

为了便于在优化模型中考虑，对式(2)~(4)进行差分离散化，输气管道动态约束简洁表示为

$$f(\Pi_{n,i}^t, \Pi_{n,j}^t, M_{in,ij}^t, M_{out,ij}^t) = 0, \quad t \in S_T, ij \in S_P \quad (5)$$

式中： $\Pi_{n,i}^t$ 、 $\Pi_{n,j}^t$ 分别表示管道首端、末端的节点气压； $M_{in,ij}^t$ 、 $M_{out,ij}^t$ 分别表示流进、流出管道的天然气质量流量； S_P 系统中输气管道的集合。

约束式(5)为一组线性代数约束，具体转化过程将在本文第 3 部分进行介绍。

2.1.2 输气网初始约束和边界约束

根据输气管网给定的初始和边界条件，对式(5)进行求解可得气压和流量的动态分布。初始约束指管网上一稳态的值。边界约束指管道末端的边界条件，包括节点流量平衡约束、气压边界、流量边界以及气源的供气限制。

$$\sum_{i \in S_{i \rightarrow j}} M_{out,ij}^t = \sum_{k \in S_{j \rightarrow k}} M_{in,jk}^t, \quad t \in S_T, j \in S_1 \quad (6)$$

$$\Pi_{n,j}^t = \Pi_{nc,ij}^0, \quad t \in S_T, ij \in S_{NC} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Pi_{n,j}^t = \Pi_{c,ij}^0, & u_{c,ij}^t = 1, t \in S_T, ij \in S_C \\ \Pi_{n,j}^t = \Pi_{n,i}^t, & u_{c,ij}^t = 0, t \in S_T, ij \in S_C \end{cases} \quad (8)$$

$$M_{in,ij}^t = M_{out,ij}^t, \quad t \in S_T, ij \in S_C \cup S_{NC} \quad (9)$$

$$\Pi_{n-ns,i}^t = \Pi_{ns,i}^0, \quad t \in S_T, i \in S_{NS} \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 < \Pi_{n-s,i}^t < \Pi_{s,i}^0, & u_{s,i}^t = 0, t \in S_T, i \in S_S \\ \Pi_{n-s,i}^t = \Pi_{s,i}^0, & u_{s,i}^t = 1, t \in S_T, i \in S_S \end{cases} \quad (11)$$

$$\underline{M}_{ns,i} \leq M_{in-ns,i}^t \leq \bar{M}_{ns,i}, \quad t \in S_T, i \in S_{NS} \quad (12)$$

$$u_{s,i}^t \underline{M}_{s,i} \leq M_{in-s,i}^t \leq u_{s,i}^t \bar{M}_{s,i}, \quad t \in S_T, i \in S_S \quad (13)$$

$$M_{out-1,i}^t = M_{1,i}, \quad t \in S_T, i \in S_{GL} \quad (14)$$

式中： $u_{c,ij}^t$ 、 $u_{s,i}^t$ 为 0-1 整数决策变量，分别表示电驱动压缩站、电驱动气源的供电状态，若已恢复取 1，否则取 0； $\Pi_{nc,ij}^0$ 、 $\Pi_{c,ij}^0$ 、 $\Pi_{ns,i}^0$ 、 $\Pi_{s,i}^0$ 分别表示非电驱动压缩站、电驱动压缩站、非电驱动气源、电驱动气源的出口压力设定值； $\Pi_{n-ns,i}^t$ 、 $\Pi_{n-s,i}^t$ 分别表示非电驱动气源、电驱动气源的节点气压； $M_{in-ns,i}^t$ 、 $M_{in-s,i}^t$ 、 $M_{out-1,i}^t$ 分别表示非电驱动气源、电驱动气源、天然气负荷的管道天然气流量； $\bar{M}_{ns,i}$ 、 $\underline{M}_{ns,i}$ 、 $\bar{M}_{s,i}$ 、 $\underline{M}_{s,i}$ 分别表示非电驱动气源、电驱动气源供气能力的上下限； $M_{1,i}$ 为天然气负荷量； S_1

表示管道交汇点的集合; $S_{i \rightarrow j}$ 、 $S_{j \rightarrow k}$ 分别表示天然气流入节点 j 的上游节点、天然气流出节点 j 的下游节点的集合; S_C 、 S_{NC} 、 S_S 、 S_{NS} 、 S_{GL} 分别表示电驱动压缩站、非电驱动压缩站、电驱动气源、非电驱动气源、天然气负荷的集合。

约束式(6)为天然气流量平衡约束; 约束式(7)表示非电驱动压缩站的出口压力恒为设定值; 约束式(8)表示电驱动压缩站失去电力供应, 则进入旁通模式, 即压缩站首端气压与末端气压相等, 恢复供电后, 电驱动压缩站将出口压力恒为设定值; 约束式(9)为压缩站的流量约束; 约束式(10)表示非电驱动气源的出口压力恒为设定值; 约束式(11)表示失去电力供应后, 电驱动气源不具备出口压力控制能力, 恢复供电后, 电驱动气源将出口压力恒定为设定值; 约束式(12)和(13)为气源出力上下限约束, 对于电驱动气源, 失去电力供应之后, 不具备供气能力; 约束式(14)为负荷节点的天然气消耗。

电驱动压缩站压力约束式(8)和电驱动气源压力约束式(11)为含有条件判断的约束, 本文利用“大M法”对约束进行处理, 引入数值非常大的正整数 N , 将其转化为线性不等式约束。

$$\Pi_{n,i}^t \leq \Pi_{n,j}^t \leq \Pi_{n,i}^t + u_{c,ij}^t N, \quad t \in S_T, ij \in S_C \quad (15)$$

$$\Pi_{c,ij}^0 - (1 - u_{c,ij}^t)N \leq \Pi_{n,j}^t \leq \Pi_{c,ij}^0 + (1 - u_{c,ij}^t)N, \quad t \in S_T, ij \in S_C \quad (16)$$

$$0 \leq \Pi_{n-s,i}^t \leq \Pi_{s,i}^0 + u_{s,i}^t N, \quad t \in S_T, i \in S_S \quad (17)$$

$$\Pi_{s,i}^0 - (1 - u_{s,i}^t)N \leq \Pi_{n-s,i}^t \leq \Pi_{s,i}^0 + (1 - u_{s,i}^t)N, \quad t \in S_T, i \in S_S \quad (18)$$

2.2 耦合设备约束

本文关注的耦合设备包括燃气机组、电驱动压缩站和电驱动气源, 考虑的耦合约束包括耦合设备恢复逻辑约束以及能量转换约束。

2.2.1 燃气机组

$$P_{g,i}^t = k_i M_{f,i}^t, \quad t \in S_T, i \in S_F \quad (19)$$

$$u_{f,i}^t \underline{\Pi}_{f,i} \leq \Pi_{n-f,i}^t, \quad t \in S_T, i \in S_F \quad (20)$$

$$u_{f,i}^t \leq u_{f,i}^{t+1}, \quad t \in S_T / T, i \in S_F \quad (21)$$

$$u_{g,i}^t \geq u_{f,i}^t, \quad t \in S_T, i \in S_F \quad (22)$$

式中: $u_{f,i}^t$ 为0-1 整数决策变量, 表示燃气机组是否具备供气条件, 若具备取1, 否则取0; $P_{g,i}^t$ 为机组出力; $M_{f,i}^t$ 表示燃气机组的天然气消耗量; k_i 表示机组的能量转化参数; $\Pi_{n-f,i}^t$ 为燃气机组供气节点气压; $\underline{\Pi}_{f,i}$ 为燃气机组对供气节点的最低气压要求;

S_F 表示系统中燃气机组的集合。

约束式(19)为燃气机组的能量转换关系; 约束式(20)为燃气机组对供气节点的气压要求, 燃气机组的成功启动与正常运行要求供气压力达到一定值, 供气节点压过低会导致燃气机组发生运行故障甚至停运^[16]; 约束式(21)表示燃气机组的天然气供应恢复后不再中断; 约束式(22)表示燃气机组启动时应具备天然气供应条件。

2.2.2 电驱动压缩站

$$u_{c,ij}^t \leq u_{id-c,ij}^t, \quad t \in S_T, ij \in S_C \quad (23)$$

$$u_{c,ij}^t \leq u_{c,ij}^{t+1}, \quad t \in S_T / T, ij \in S_C \quad (24)$$

式中 $u_{id-c,ij}^t$ 表示给电驱动压缩站供电的负荷的状态。

约束式(23)表示电驱动压缩站恢复的前提是为其供电的负荷恢复, 约束式(24)表示电驱动压缩站供电恢复后不再断开。

2.2.3 电驱动气源

$$u_{s,i}^t \leq u_{id-s,i}^t, \quad t \in S_T, i \in S_S \quad (25)$$

$$u_{s,i}^t \leq u_{s,i}^{t+1}, \quad t \in S_T / T, i \in S_S \quad (26)$$

式中 $u_{id-s,i}^t$ 表示给电驱动气源供电的负荷的状态。

约束式(25)表示电驱动气源恢复的前提是为其供电的负荷恢复, 约束式(26)表示电驱动气源供电恢复后不再断开。

综上所述, 计及两网双向耦合特性的机组恢复问题建立为混合整数线性规划模型, 具体如下:

max(1)

s.t.(A1)—(A16), (5)—(7), (9)—(10), (12)—(26)

3 偏微分方程约束处理

上述模型中, 约束式(5)为对 PDE 约束进行差分离散化得到的线性代数约束。本部分将详细阐述线性约束式(5)得到的过程。

针对描述管道动态的偏微分方程组, 即式(2)—(4), 采用 Wendroff 差分格式将其转化为线性代数方程式^[17]:

$$\rho_{n,j}^{t+1} + \rho_{n,i}^{t+1} - \rho_{n,j}^t - \rho_{n,i}^t + \Delta t / L_{ij} A_{ij} (M_{out,ij}^{t+1} - M_{in,ij}^{t+1} + M_{out,ij}^t - M_{in,ij}^t) = 0, \quad t \in S_T / T, ij \in S_p \quad (27)$$

$$\frac{1}{A_{ij}} (M_{out,ij}^{t+1} + M_{in,ij}^{t+1} - M_{out,ij}^t - M_{in,ij}^t) + \frac{\Delta t}{L_{ij}}$$

$$(\Pi_{n,j}^{t+1} - \Pi_{n,i}^{t+1} + \Pi_{n,j}^t - \Pi_{n,i}^t) + \frac{\lambda \bar{\omega}_{ij} \Delta t}{4D_{ij} A_{ij}} (M_{out,ij}^{t+1} +$$

$$M_{in,ij}^{t+1} + M_{out,ij}^t + M_{in,ij}^t) = 0, t \in S_T / T, ij \in S_p \quad (28)$$

$$\Pi_{n,i}^t = c^2 \rho_{n,i}^t, \quad t \in S_T, i \in S_N \quad (29)$$

式中： L_{ij} 为差分空间步长，即管道长度； Δt 为差分时间步长，即恢复时段长度； S_N 为输气节点的集合。

约束式(27)–(29)分别表示差分离散后的连续性方程、动量方程和气体状态方程，为式(5)的具体形式。

值得说明的是，二阶精度差分格式在间断附近普遍存在数值振荡问题^[18]。本文采用的 Wendroff 差分格式具有二阶精度^[17]，恢复过程中管网气压边界出现间断，计算数值解时可能出现振荡现象。为保证决策的准确性，本文采取对相连时段的气压值取平均的方式进行数值振荡处理，并在算例分析部分验证所提处理方式能够满足决策需求。约束式(20)处理为

$$u_{f,i}^t \Pi_{f,i} \leq \Pi_{n-f,i}^{ave,t}, \quad t \in S_T, i \in S_F \quad (30)$$

式中 $\Pi_{n-f,i}^{ave,t}$ 为燃气机组供气节点相连时段气压的平均值。

综上所述，计及两网双向耦合特性的机组恢复的混合整数线性规划模型具体如下：

$$\begin{aligned} & \max(1) \\ & \text{s.t. (A1)–(A16), (6)–(7), (9)–(10),} \\ & \quad (12)–(19), (21)–(30) \end{aligned}$$

4 算例分析

针对建立的考虑两网耦合特性的机组恢复优化决策模型进行测试。其中，优化模型利用 Julia 语言的 Convex 工具包建立，并利用 MOSEK 求解器进行求解。测试环境为 Intel Core i7 中央处理器，主频 2.6GHz，运行内存 16GB。

4.1 算例信息

测试系统由新英格兰 10 机 39 节点系统^[19]与比利时 20 节点输气系统^[20]组成，耦合系统拓扑如图 2 所示。测试系统中，线路参数和机组参数见文献[19]，输气管网参数见文献[20]，耦合设备参数见附录 B。输电网系统中，G1、G2、G4、G6 和 G8 为燃气机组；G10 为黑启动机组；负荷 13 和 27 为关键负荷；关键负荷最晚恢复时间 T_{LD} 取 180min。输气网系统中，CP1 和 CP2 均为电驱动压缩站；GS3 为电驱动气源，其他气源为非电驱动气源。

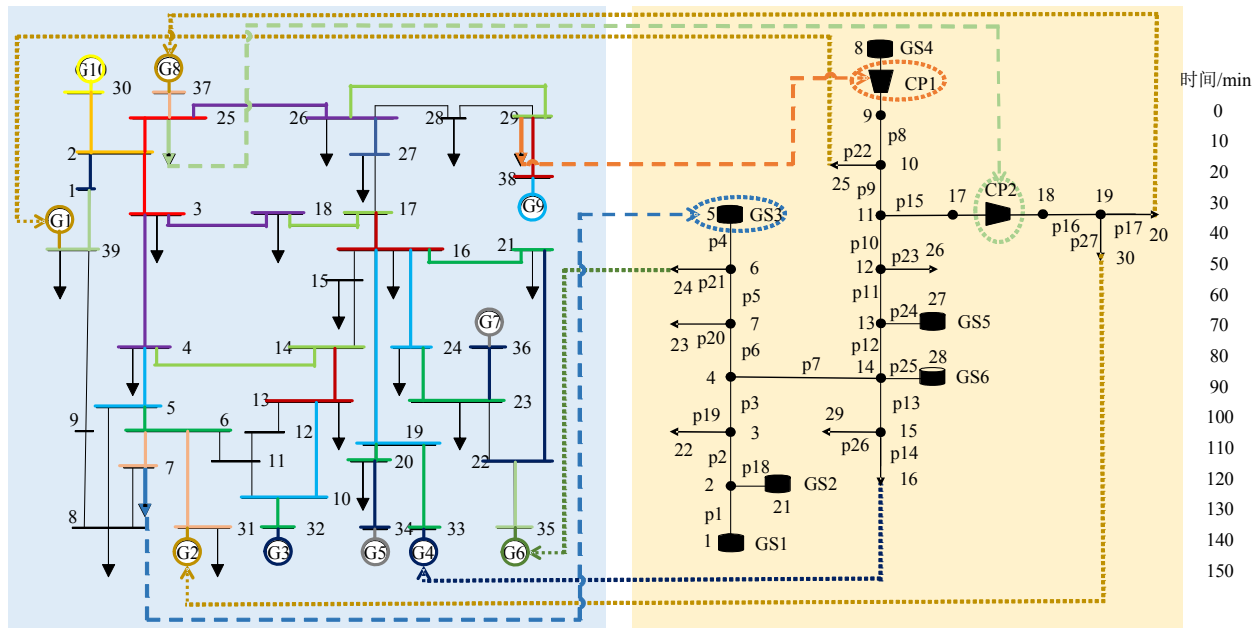


图 2 机组恢复时序操作

Fig. 2 Timing sequential actions of generator start-up

假设大停电后，输电网需进行黑启动，黑启动机组 G10 在 0min 时成功启动；输气管网在低气压水平和天然气供应受限的情况下运行，燃气机组的恢复受到影响。恢复时段的长度 Δt 为 10min，恢复总时段 T 为 50 段。

4.2 机组恢复策略结果

应用本文所提方法求得机组恢复策略，求解时

间为 473.63s，具体机组恢复时序操作如图 2 所示。机组恢复进程以黑启动机组 G10 为起点，逐步恢复送电路径，启动非黑启动机组，同时，恢复输气网电驱动设施的供电，进而恢复输气管网的气压，支撑燃气机组的恢复。

机组的恢复时刻和输气网电驱动设施供电恢复时刻分别见表 1、2。所有机组在 150min 内完成

表1 机组恢复方案

Table 1 Schemes of generator start-up

恢复时间/min	机组编号	具备充电条件的 时间/min	供气节点 气压恢复时间/min
0	G10	—	—
60	G9	60	—
80	G3	80	—
80	G4	80	0
90	G5	90	—
90	G7	90	—
130	G6	90	130
150	G1	80	150
150	G2	80	150
150	G8	40	150

表2 输气网电驱动设施供电恢复时间

Table 2 Schemes of power supply restoration of electricity-driven facilities in GTN

供电恢复时间/min	输气网电驱动设施
100	CP2
120	GS3
140	CP1

启动, 输气网电驱动设施在 140min 内完成供电恢复。燃气机组的恢复受外部系统提供启动功率和天然气供应两方面的影响。需要指出的是, 由于部分气网关键设施并非电驱动的, 燃气机组 G4 的供气并未受到大停电的影响。从表 1 可以看出, 受输气管网慢动态过程的影响, 燃气机组的恢复时刻主要由供气节点气压恢复时间决定。因此, 尽早恢复输气网电驱动设施的供电有利于燃气机组的快速恢复。但系统恢复初期, 发电能力有限, 需兼顾启动非黑启动机组和恢复输气网电驱动设施供电。

结合表 1 和 2 可以看出, 电驱动压缩站 CP2 于 100min 时供电恢复, 但燃气机组 G8 供气节点气压直到 150min 时才恢复。相比于输电网分钟级别的通用恢复操作(见附表 C1), 输气管网气压恢复是小时级别的缓慢过程。因此, 在机组恢复决策中有必要考虑两系统的时间尺度差异。

本文方法下, 关键负荷 13 和 27 分别在第 60min 和 180min 恢复, 与文献[13]方法下的恢复时间一致。其中, 负荷 13 在第 60min 时恢复以用于平衡恢复送电路径产生的无功。需要指出的是, 本文设定关键负荷的最晚恢复时间为 180min, 而在实际决策中, 关键负荷的恢复需综合考虑重要性、规模以及恢复过程等因素。恢复初期, 系统发电能力有限, 关键负荷的恢复可能造成输气网电驱动设施供电

恢复的推迟。

4.3 机组恢复策略对比

为了说明本文方法考虑两网双向耦合特性和输气网慢动态过程的必要性和优势, 分别与将输气网电驱动负荷考虑为一般负荷、不考虑耦合影响的机组恢复策略(策略 1)和将输气网电驱动负荷考虑为关键负荷、不考虑耦合影响的机组恢复策略(策略 2)进行对比。策略 1 和策略 2 均由文献[13]提出的模型计算得出。表 3 为不同恢复策略的具体信息对比。表 4 为不同恢复策略下电驱动设施的恢复时间。策略 1 和策略 2 的区别在于两种策略下输气网电驱动设施的恢复时间不同, 从而导致燃气机组的真实启动时间不同。系统恢复一般历时 3~4 个小时后进入负荷恢复阶段^[4], 因此策略 1 中输气网电驱动设施的恢复时间统一取为 3.5 小时(210min); 策略 2 下输气网电驱动设施的恢复时间由文献[13]方法计算得到。在此基础上, 结合输气网动态过程可得到策略 1 和策略 2 下的燃气机组真实启动时间。

表3 不同策略信息对比

Table 3 Comparison for different strategies

机组恢复策略	输气网电驱动设施	两网耦合影响
策略 1	一般负荷, 负荷恢复阶段	未考虑
策略 2	关键负荷, 优先恢复	未考虑
本文方法	一般负荷	考虑

表4 不同策略下输气网电驱动设施供电恢复时间

Table 4 Power supply restoration time of electricity-driven facilities in GTN for different strategies

机组恢复策略	CP1 供电 恢复时间/min	CP2 供电 恢复时间/min	GS3 供电 恢复时间/min
策略 1	210	210	210
策略 2	130	130	180
本文方法	140	100	120

图 3 为不同机组恢复策略下燃气机组节点气压曲线对比。其中, 本文方法下 CP2 于 100min 时恢复, 导致位于 CP2 上游的 G1 供气节点气压下降, 随着 CP1 的恢复, G1 供气节点气压快速恢复。相比策略 1 和策略 2, 本文方法下燃气机组供气节点气压得以更快地恢复, 支撑燃气机组快速启动。

图 4 为 3 种机组恢复策略的系统发电能力曲线。对比策略 1 和 2 可以看出, 随着输气网电驱动负荷恢复优先级的提高, 系统发电能力得到更快地恢复。相比策略 2, 本文方法下的系统发电能力能够更快地恢复。其原因在于, 策略 2 缺乏考虑输气网电驱动设施恢复对系统发电能力恢复的影响, 所

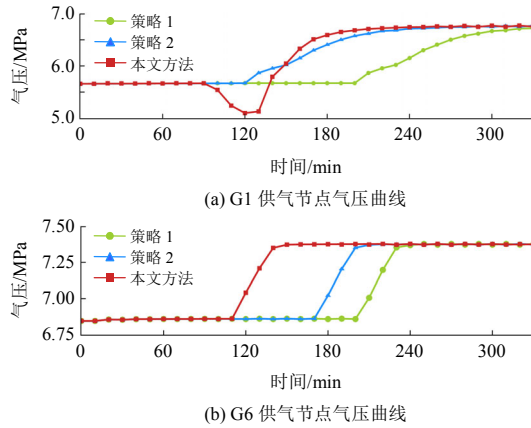


图 3 不同机组恢复策略下燃气机组节点气压曲线对比
Fig. 3 Comparison of pressure curves of gas-fired units for different strategies

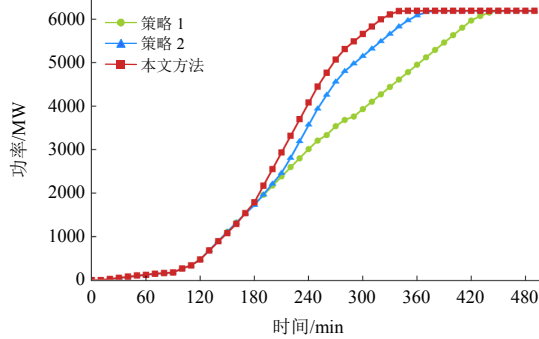


图 4 不同机组恢复策略下系统发电能力曲线对比
Fig. 4 Comparison of system generation capability curves for different generator start-up strategies

得策略不一定是最优策略；本文方法计及两网的双向耦合特性进行决策，优先恢复对系统发电能力影响更大的电驱动压缩站 CP2，以更快地启动燃气机组 G2 和 G8，随后恢复电驱动气源 GS3、电驱动压缩站 CP2 以及受其影响的燃气机组。

表 5 为 3 种恢复策略结果的对比。结合图 4 和表 5 可以看出，相比策略 1 和策略 2，本文方法能够更准确地决策燃气机组的恢复时间，且能够更快地恢复系统的发电能力。其中，第 380min 时，本文方法下获得的系统发电能力比策略 2 多 1300MW·h。

表 5 不同机组恢复策略结果对比
Table 5 Result comparison for different generator start-up strategies

恢复策略	机组恢复策略	系统最大发电能力/MW	系统恢复最大发电能力所需时间/min
策略 1	G:10-8(等待)-9-1(等待)-2(等待)-3-4-5-6(等待)-7-1-2-8-6	6193	460
策略 2	G:10-8(等待)-9-1(等待)-2(等待)-3-4-5-6(等待)-7-1-6-2-8	6193	380
本文方法	G:10-9-3-4-5-7-6-1-2-8	6193	350

此外，本文方法下系统恢复最大发电能力所需时间比策略 2 缩短了 30min。由上，对于与输气网高度耦合的输电网，本文提出的考虑两网双向耦合特性的机组恢复策略能够更快地恢复系统的发电能力，支撑系统快速恢复。

4.4 输气网慢动态过程分析验证

将输气网电驱动设施的供电恢复时刻作为 PipelineStudio 天然气管网仿真软件^[21]的输入，对输气管网的气压恢复动态过程进行仿真分析对比。图 5 为燃气机组供气节点气压变化曲线对比。可以看出，本文方法基本刻画了输气管网气压恢复的慢动态过程，所采用数值振荡处理方法有效处理了数值振荡。燃气机组供气节点气压恢复时刻的仿真对比见表 6。与 PipelineStudio 仿真结果相比，无数值振荡处理方法下，燃气机组 G2 和 G5 的供气节点气压恢复时间误差超过 15min，可能造成机组恢复的短时间等待；本文方法下 5 台燃气机组供气节点气压恢复时刻的绝对误差均小于 10min。因此，本文方法对燃气机组供气节点的气压恢复时间的刻画是相对准确的，可满足机组恢复决策需求。

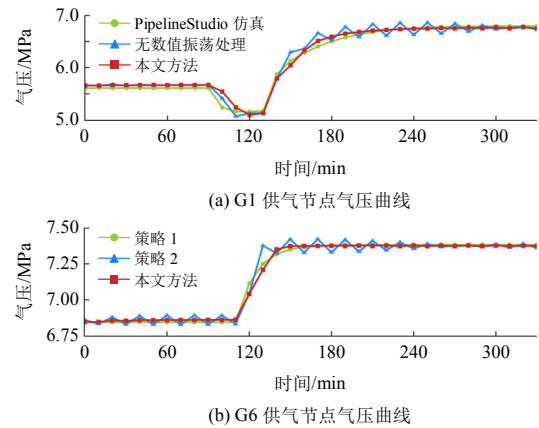


图 5 燃气机组供气节点气压曲线对比
Fig. 5 Comparison of pressure curves of gas node for gas-fired units

表 6 燃气机组供气节点气压恢复时间对比

Table 6 Comparison of pressure restoration time of gas node for gas-fired units

燃气机组	本文方法/min	无数值振荡处理/min	PipelineStudio 仿真/min
G1	150	150	155
G2	150	140	156
G4	0	0	0
G6	130	130	136
G8	150	140	156

5 结论

针对高度耦合的输电网和输气网，本文围绕大

停电后的机组恢复问题进行了研究。首先分析了输电网和输气网在大停电后恢复过程中的动态特性及双向耦合影响,明确在机组恢复阶段考虑两网耦合的必要性;其次,计及输气网慢动态过程及两网双向耦合特性,构建了机组恢复问题的混合整数线性规划模型,其中,采用有限差分方法将气网动态特性的PDE建模为线性代数约束,并针对可能出现的数值振荡现象提出初步解决思路。算例验证表明本文所提方法能够统筹两网耦合特性,有效决策机组恢复策略,快速恢复系统的发电能力。

实际系统恢复过程中,系统状态复杂多变,可能导致最初决策的恢复策略并非最优甚至不可行。运行人员可根据实时情况,利用本文方法决策新的机组恢复策略,从而实现恢复策略的动态调整更新。此外,随着可再生能源不断接入,将可再生能源考虑到系统恢复中,有利于增加系统发电能力,加速恢复进程。未来将进一步探索如何在模型中考虑可再生能源和负荷的不确定性,并深入研究气网动态偏微分方程组差分化可能产生振荡问题的处理方式。

参考文献

- [1] 侯验秋,丁一,包铭磊,等.电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7764-7775.
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7764-7775(in Chinese).
- [2] 安学民,孙华东,张晓涵,等.美国得州“2.15”停电事件分析及启示[J].中国电机工程学报,2021,41(10):3407-3415.
AN Xuemin, SUN Huadong, ZHANG Xiaohan, et al. Analysis and lessons of Texas power outage event on February 15, 2021[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3407-3415(in Chinese).
- [3] MAGNESS B. Review of February 2021 extreme cold weather event: ERCOT presentation[EB/OL]. Texas: ERCOT, 2021[2021-08-23]. https://www.ercot.com/files/docs/2021/03/03/Texas_Legislature_Hearings_2-25-2021.pdf
- [4] 刘玉田,王洪涛,叶华.电力系统恢复理论与技术[M].北京:科学出版社,2014:117-131.
LIU Yutian, WANG Hongtao, Ye Hua. Power system restoration theory and technology[M]. Beijing: Science Press, 2014: 117-131(in Chinese).
- [5] LIU Yutian, FAN Rui, TERZIJA V. Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 332-341.
- [6] LIN Yanling, CHEN Bo, WANG Jianhui, et al. A combined repair crew dispatch problem for resilient electric and natural gas system considering reconfiguration and DG islanding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2755-2767.
- [7] LI Guoqing, YAN Kefei, ZHANG Rufeng, et al. Resilience-oriented distributed load restoration method for integrated power distribution and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 341-352.
- [8] LI Jiaxu, XU Yin, WANG Ying, et al. Resilience-motivated distribution system restoration considering electricity-water-gas interdependency[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4799-4812.
- [9] LI Xue, DU Xiaoxue, JIANG Tao, et al. Coordinating multi-energy to improve urban integrated energy system resilience against extreme weather events[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118455.
- [10] YUN Jingyang, YAN Zheng, ZHOU Yun, et al. Multi-time collaborative restoration for integrated electrical-gas distribution system based on rolling optimization[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020: 1-13, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.03720.
- [11] 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):41-49.
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): 41-49(in Chinese).
- [12] SANG Maosheng, DING Yi, BAO Minglei, et al. Resilience-based restoration strategy optimization for interdependent gas and power networks[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117560.
- [13] JIANG Yazhou, CHEN Sijie, LIU C C, et al. Blackstart capability planning for power system restoration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 86: 127-137.
- [14] 严铭卿.燃气输配工程分析[M].北京:石油工业出版社,2007:42-46.
YAN Mingqing. Engineering analysis of gas transportation & distribution[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 42-46(in Chinese).
- [15] 王程,吴科宏,贾起越,等.基于显式差分的区域电-气综合能源系统动态能流计算方法[J].中国电机工程学报,2022,42(16):5775-5785+6155.

- WANG Cheng, WU Kehong, JIA Qiyue, et al. An explicit difference based calculation method for dynamic energy flow of integrated electric-gas systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5775-5785+6155(in Chinese).
- [16] FREEMAN G, APT J, DWORKIN M. The natural gas grid needs better monitoring[J]. Issues in Science and Technology, 2018, 34(4): 79-84.
- [17] FANG Jiakun, ZENG Qing, AI Xiaomeng, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 188-198.
- [18] 陆金甫. 偏微分方程数值解法[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2004: 149-155.
- LU Jinfu. Numerical solution of partial differential equations[M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 149-155(in Chinese).
- [19] SUN Wei, LIU C C. Optimal transmission path search in power system restoration[C]//2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid. Rethymno, Greece: IEEE, 2013.
- [20] DE WOLF D, SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm[J]. Management Science, 2000, 46(11): 1454-1465.
- [21] 苏欣, 章磊, 刘佳, 等. SPS 与 TGNET 在天然气管网仿真中应用与认识[J]. 天然气与石油, 2009, 27(1): 1-3, 10.
- SU Xin, ZHANG Lei, LIU Jia, et al. Application of SPS and TGNET in natural gas pipeline network simulation [J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(1): 1-3, 10(in Chinese).
- [22] SUN Wei, LIU C C, ZHANG Li. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1357-1366.
- [23] WU J S, LIU C C, LIU K L, et al. A Petri net algorithm for scheduling of generic restoration actions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 69-76.

附录 A 输电网约束

1) 机组出力函数线性化。

图 A1 所示为机组出力函数示意图^[22]。

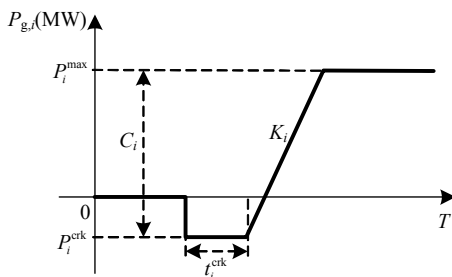


图 A1 机组出力函数

Fig. A1 Generation unit output function

图 A1 中, P_i^{\max} 为机组最大出力, K_i 为机组爬坡速率, t_i^{crk} 为机组启动到开始爬坡所需的时间。

本文采用文献[13]方法对机组出力函数进行线性处理, 线性化后的机组出力函数如式(A1)所示:

$$P_{g,i}^t = \left\{ t - \sum_{j \in S_T} (1 - u_{g,i}^{j-\text{ceil}(t_i^{\text{crk}})}) - \sum_{j \in S_T} u_{g,i}^{j-\text{ceil}(t_i^{\text{crk}} + C_i / K_i)} - u_{g,i}^{t-\text{ceil}(t_i^{\text{crk}})} [1 - \text{res}(t_i^{\text{crk}})] + u_{g,i}^{t-\text{ceil}(t_i^{\text{crk}} + C_i / K_i)} [1 - \text{res}(t_i^{\text{crk}} + C_i / K_i)] \right\} K_i - u_{g,i}^t P_i^{\text{crk}}, \quad t \in S_T, i \in S_G \quad (\text{A1})$$

式中: S_t 为截至 t 时段的恢复时段的集合; S_T 为所有恢复时段的集合; S_G 表示系统内所有机组的集合; ceil 函数和 res 函数为了离散取整引入的函数, 为优化模型的约束构建提供常量参数, 定义如下:

$$\text{ceil}(x) = \begin{cases} x, & x \in Z \\ \text{大于}x\text{的最小整数}, & x \notin Z \end{cases} \quad (\text{A2})$$

$$\text{res}(x) = \text{ceil}(x) - x \quad (\text{A3})$$

2) 输电网恢复约束。

$$t_i^{\text{CL}} \leq \sum_{t \in S_T} (1 - u_{g,i}^t) + 1 \leq t_i^{\text{CH}}, \quad i \in S_G \quad (\text{A4})$$

$$u_{g,i}^{t+1} \leq u_{b,g,i}^t, \quad t \in S_T / T, i \in S_{\text{NBS}} \quad (\text{A5})$$

$$u_{g,i}^t \leq u_{b,i}^{t+1}, \quad t \in S_T / T, i \in S_{\text{NBS}} \quad (\text{A6})$$

$$0 \leq u_{l,ij}^{t+1} \leq u_{b,i}^t + u_{b,j}^t, \quad t \in S_T / T, ij \in S_L \quad (\text{A7})$$

$$0 \leq u_{b,i}^t \leq \sum_{ij \in S_{\text{L-B}_i}} u_{l,ij}^t, \quad t \in S_T, i \in S_{\text{B}} / S_{\text{B-BS}} \quad (\text{A8})$$

$$0 \leq u_{l,ij}^t \leq u_{l,ij}^{t+1}, \quad t \in S_T / T, ij \in S_L \quad (\text{A9})$$

$$0 \leq u_{b,i}^t \leq u_{b,i}^{t+1}, \quad t \in S_T / T, i \in S_{\text{B}} \quad (\text{A10})$$

$$Q_{\text{sys}}^t = \sum_{i \in S_G} [u_{g,i}^{t-\text{ceil}(t_i^{\text{crk}})} Q_{g,i}^{\text{min}} - u_{g,i}^t Q_{g,i}^{\text{crk}}] - \sum_{j \in S_{\text{CL}}} u_{l,j}^t Q_{l,j}, \quad t \in S_T \quad (\text{A11})$$

$$Q_{\text{sys}}^t + \sum_{ij \in S_L} u_{l,ij}^t B_{l,ij} V^2 \geq 0, \quad t \in S_T \quad (\text{A12})$$

$$\sum_{i \in S_G} P_{g,i}^t - \sum_{j \in S_{\text{LD}}} u_{l,j}^t P_{l,j}^t \geq 0, \quad t \in S_T \quad (\text{A13})$$

$$u_{l,i}^{t+1} \leq u_{b-l,i}^t, \quad t \in S_T / T, i \in S_{\text{LD}} \quad (\text{A14})$$

$$u_{l,i}^t \leq u_{l,i}^{t+1}, \quad t \in S_T / T, i \in S_{\text{LD}} \quad (\text{A15})$$

$$\sum_{t \in S_T} (1 - u_{l,i}^t) + 1 \leq T_{\text{CL}}, \quad i \in S_{\text{CL}} \quad (\text{A16})$$

式中: $u_{b,i}^t$ 、 $u_{l,ij}^t$ 、 $u_{l,i}^t$ 为 0-1 整数决策变量, 分别表示母线节点、路径、负荷的状态, 若已恢复取 1, 否则取 0; $u_{b-g,i}^t$ 、 $u_{b-l,i}^t$ 分别表示与非黑启动机组、负荷相连的母线节点状态; t_i^{CH} 、 t_i^{CL} 分别表示机组启动需满足最大临界时间和最小临界时间; $P_{l,j}^t$ 表示负荷的功率; Q_{sys}^t 、 $Q_{g,i}^{\text{min}}$ 、 $Q_{g,i}^{\text{crk}}$ 、 $Q_{l,j}$ 分别表示系统无功功率、机组的最小无功出力、机组启动无功功率、负荷无功功率; $B_{l,ij}$ 表示线路的电纳; V 表示线路的电压水平; T_{CL} 表示关键负荷最晚恢复时间; S_T / T 表示不包括第 T 时段的恢复时段的集合; S_G 表示系统中所有机组的集合; S_L 、 S_{B} 、 $S_{\text{L-B}_i}$ 、 $S_{\text{B-BS}}$ 、 $S_{\text{B}} / S_{\text{B-BS}}$ 分别表示系统中的路径、母线节点、与母线节点 i 相连的路径、与黑启动机组相连的母线节点、除去与黑启动机组相连母线节点之外母线节点的

集合; S_{LD} 、 S_{CL} 分别表示系统中负荷、关键负荷的集合。

约束式(A4)为机组启动需满足的最大和最小临界时间约束; 约束式(A5)和(A6)为非黑启动机组启动的恢复逻辑约束; 约束式(A7)~(A10)为路径的恢复逻辑约束; 约束式(A11)和(A12)表示系统应有足够的无功平衡能力, 以应对空充线路和变压器产生的感性无功^[13]; 约束式(A13)为系统有功功率约束; 约束式(A14)和(A15)为负荷恢复的逻辑约束; 约束式(A16)表示关键负荷需在设定的时间前恢复。

附录 B 耦合设备参数

表 B1 燃气机组参数

Table B1 Parameters of gas fired-units

燃气机组	转化参数	气压要求/MPa
G1	16.75kg/(s·MW)	6
G2	16.75 kg/(s·MW)	6
G4	16.75 kg/(s·MW)	6
G6	16.75 kg/(s·MW)	7.2
G8	16.75 kg/(s·MW)	6

表 B2 电驱动压缩站参数

Table B2 Parameters of electricity-driven compression stations

压缩站	出口压力/MPa
CP1	7.7
CP2	7

表 B3 电驱动气源参数

Table B3 Parameters of electricity-driven gas source

气源	出口压力/MPa
GS3	7.7

附录 C 输电网通用恢复操作时间

表 C1 输电网通用恢复操作时间

Table C1 Time to complete generic restoration actions for PTN

输电网恢复操作	时间/min
启动黑启动机组	15
充电输电线路	5
充电母线	5
充电机组	15
负荷恢复	10
孤岛同期并列	20
联络线合闸	25

附录 D 机组恢复操作表

表 D1 机组恢复操作表

Table D1 Time table of restoration actions for generator start-up

时间/min	机组	输气网电驱动设施	母线节点	路径
0	G10	-	30	-
10	-	-	2	30-2
20	-	-	3,25	2-3,2-25
30	-	-	4,18,26	3-4,3-18,25-26
40	-	-	14,17,29	4-14,18-17,26-29
50	-	-	13,16,38	14-13,17-16,29-38
60	G9	-	5,10,19,24	4-5,13-10,16-19,16-24
70	-	-	6,20,21,23,32,33	5-6,10-32,16-21,19-20,19-33,24-23
80	G3,G4	-	1,22,34,36	2-1,20-34,21-22,23-36
90	G5,G7	-	-	-
100	-	CP2	35,39	1-39,22-35
110	-	-	7,31,37	6-7,6-31,25-37
120	-	GS3	-	-
130	G6	-	-	-
140	-	CP1	-	-
150	G1,G2,G8	-	-	-



阚君

在线出版日期: 2022-09-29。

收稿日期: 2022-05-08。

作者简介:

阚君(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统恢复, kanjun@bjtu.edu.cn;

许寅(1986), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为韧性电网、电力交通融合、电力系统高性能计算等, xuyin@bjtu.edu.cn;

*通信作者: 王颖(1992), 女, 博士, 高聘副教授, 主要研究方向为韧性电网、配电网故障恢复、电力交通融合等, wangying1@bjtu.edu.cn;

张宸庚(1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为韧性评估、气-电耦合系统故障恢复, zhangchengeng@bjtu.edu.cn;

杜洋(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为城市电网韧性、气-电系统协同防御和恢复, du-epri@qq.com;

郭灵瑜(1993), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为城市电网韧性、气电系统协同防御和恢复, guolingyu@sh.sgcc.com。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)