

考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性评估

龚凌霄¹, 刘天琪¹, 何川¹, 南璐¹, 苏学能², 胡晓通³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610094;

3. 国网四川省电力公司调度控制中心, 四川 成都 610094)

摘要:气电联合系统是能源互联网的重要组成部分,其可靠性评估对系统安全运行具有重要意义。因此,提出一种考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性评估方法。首先建立气电联合系统负荷削减优化模型,利用泰勒级数展开法对考虑气网潮流方向和天然气管道运行状态的天然气潮流约束方程进行线性化处理;其次引入电、气负荷综合需求响应以提升系统可靠性,并对可中断和可转移电、气需求响应负荷进行建模;然后提出考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性评估指标,并基于序贯蒙特卡洛模拟法获取系统设备元件的运行状态,评估考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性;最后对IEEE 24-NGS 12气电联合系统进行算例分析,评估了7种不同场景下气电联合系统的可靠性,仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:气电联合系统;可靠性评估;负荷削减;泰勒级数展开法;综合需求响应

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109010

0 引言

能源互联网是以电力为枢纽和平台的新一代能源系统,是支撑能源革命的变革性技术之一^[1]。由电力系统和天然气系统耦合而成的气电联合系统作为能源互联网的重要组成部分,对促进可再生能源消纳、实现低碳环保具有重要意义。近年来,随着电力系统和天然气系统耦合程度的加深,传统局限于电、气子系统的可靠性评估已不能实现系统供电、供气可靠性水平的准确量化。因此,有必要建立气电联合系统可靠性模型并研究其可靠性评估方法,以期综合能源系统的安全运行奠定科学、有效的理论基础。

目前,针对综合能源系统可靠性评估的基本步骤主要包括系统状态获取、系统建模与求解、可靠性指标计算^[2]。其中,系统状态获取大多采用蒙特卡洛模拟法。文献[3]将多能流计算与序贯蒙特卡洛法相结合,提出一种综合能源系统序贯模拟可靠性评估方法;文献[4]提出一种马尔科夫链蒙特卡洛方法,将随机过程中的马尔科夫过程引入蒙特卡洛模拟中,实现动态蒙特卡洛模拟;文献[5]建立了负荷及风速的不确定性模型,并采用非序贯蒙特卡洛法对系统元件进行抽样;文献[6]采用解析法对气电耦合综合能源系统进行可靠性评估,同时考虑气网故障对供电可靠性的影响。在系统建模与求解方面,文献[7]提出了一种考虑热惯性的综合能源系统统

化运行模型;文献[8]建立了区域综合能源系统负荷削减优化模型,并使用粒子群-内点混合优化算法进行求解;文献[9]计及天然气网络状态,对区域综合能源系统中的天然气环节进行稳态建模与潮流计算。上述文献所建立的气电联合系统模型大多是非线性的,求解较为困难。目前对于气电联合系统模型中的非线性天然气潮流方程的处理方法主要有2种:①利用线性化方法将原问题转化为混合整数线性规划模型进行求解;②利用锥优化方法将原问题转化为混合整数二阶锥SOC(Second-Order Cone)规划模型进行求解。文献[10]采用分段线性化方法对著名的Weymouth稳态天然气潮流方程进行线性化处理;文献[11]采用二阶锥规划方法对电力系统和天然气系统潮流方程进行处理;文献[12]对气网潮流方程进行二阶锥松弛,转化为混合整数二阶锥规划模型进行求解。在可靠性评估指标方面,文献[13]研究并提出了区域综合能源系统的运行可靠性指标;文献[14]考虑弃风现象和电转气(P2G)设备,提出了系统级和设备级的可靠性指标。

需求响应DR(Demand Response)是需求侧负荷参与电网灵活互动的重要途径,国内外的研究表明,需求响应能够在一定程度上维持电力系统稳定性,促进可再生能源消纳,减小负荷峰谷差,降低系统运行成本。近年来,随着能源互联网的发展和不同能源间耦合程度的加深,衍生出多种能源的综合需求响应IDR(Integrated Demand Response)。综合需求响应对维持多能源系统安全运行具有重要意义。2021年2月15日,美国得克萨斯州电网发生大停电事件,这次大停电部分原因在于极寒气候下发电机组和燃气机组出力下降,无法可靠供电,若电负荷与

收稿日期:2021-04-16;修回日期:2021-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007125)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007125)

气负荷能提供需求响应,则能够避免一些强制停电的情况。进一步而言,有必要考虑气电联合系统的可靠性,单纯以经济性最优为目标函数的规划问题不能满足极端气候下多能源系统的可靠运行。目前,对于综合需求响应的研究大多侧重于综合能源系统的规划和优化运行^[15-18]。文献[15]对综合需求响应的建模方法进行了介绍,提出了一种综合需求响应协调优化模型;文献[16]建立了电热耦合系统的综合需求响应模型,分析了不同响应方案下的可靠性和经济性;文献[17]考虑气电联合需求响应,建立了气电综合能源系统的协调优化调度模型;文献[18]研究了计及电、气、热储能电、热负荷需求响应,建立了多能源系统负荷削减优化模型并采用蒙特卡洛模拟法对其进行可靠性评估。

通过阅读此类文献,发现在气电联合系统可靠性评估中,还存在以下不足之处:①在气电联合系统可靠性评估模型的求解方面,针对非线性的天然气潮流约束,一般采用分段线性化方法进行求解,但通常难以兼顾求解精度与效率;②在可靠性评估指标方面,较少有文献提出针对气电联合系统的可靠性评估指标;③目前对于气电联合系统可靠性评估问题,鲜有研究考虑电、气负荷综合需求响应对气电联合系统可靠性的影响。

为此,本文首先以电、气负荷削减量最小为优化目标建立气电联合系统负荷削减优化模型,在此基础上利用泰勒级数展开法对约束条件中的天然气潮流约束方程进行线性化处理,同时考虑气网潮流方向和天然气管道运行状态以保证线性化的精确性;其次对典型日内可中断和可转移电、气需求响应负荷进行详细建模,引入电、气负荷综合需求响应以提高系统可靠性;再次为对气网可靠性进行量化分析,将传统电力系统可靠性评估指标扩展到天然气系统,建立切气负荷概率、气量不足时间期望、气量不足期望值作为气网可靠性指标,并提出综合需求响应贡献系数指标来刻画综合需求响应对系统可靠性的影响;此外,由于需求响应对于负荷的调整具有时序性,本文基于序贯蒙特卡洛模拟法获取系统设备元件的运行状态,评估考虑电、气负荷综合需求响应的电、气联合系统可靠性;最后对建立的气电联合系统负荷削减优化模型进行仿真分析,验证了本文所提方法的有效性。

1 考虑综合需求响应的气电联合系统负荷削减优化模型

综合需求响应可以显著提高综合能源系统的灵活性和可靠性。为了使系统尽可能避免出现负荷削减现象,或在不可避免时使负荷削减量最小,本文基于典型日建立考虑电、气负荷综合需求响应的电

联合系统负荷削减优化模型以实现该目标。

1.1 目标函数

本节以电负荷和气负荷削减量之和最小为优化目标,建立式(1)所示的目标函数。

$$\min f = \sum_e \sum_t \Delta P_{et} + \sum_m \sum_t \Delta G_{mt} \quad (1)$$

式中: ΔP_{et} 和 ΔG_{mt} 分别为时刻 t 下电负荷节点 e 和气负荷节点 m 的负荷削减量。

1.2 约束条件

1.2.1 电力系统运行约束条件

电力系统的运行约束条件包括节点功率平衡约束、传输线路约束、机组运行约束。考虑综合需求响应和电负荷削减,电力系统的节点功率平衡约束方程如式(2)所示。传输线路约束如附录A式(A1)—(A3)所示。机组运行约束如附录A式(A4)、(A5)所示。

$$\sum_{c \in N(e)} P_{ct} + \sum_{w \in N(e)} P_{wt} + \sum_{r(l) \in N(e)} P_{lt} - \sum_{s(l) \in N(e)} P_{lt} + \sum_{g \in N(e)} P_{gt} - \sum_{a \in N(e)} P_{at} = \sum_{d \in N(e)} P_{dt} - \Delta P_{et} \quad (2)$$

式中: $N(e)$ 为电力系统中连接到电负荷节点 e 的一系列设备集合; P_{ct} 为时刻 t 下非燃气常规机组 c 的出力; P_{wt} 为时刻 t 下风电场 w 的出力; P_{lt} 为时刻 t 下输电线路 l 的潮流; $s(l)$ 和 $r(l)$ 分别为输电线路 l 的送端母线和受端母线; P_{gt} 和 P_{at} 分别为时刻 t 下燃气机组 g 产生的电功率和P2G设备 a 消耗的电功率; P_{dt} 为时刻 t 下考虑需求响应后需求侧可响应负荷节点 d 的电负荷出力。

1.2.2 天然气系统运行约束条件

天然气系统主要由天然气气井、天然气传输管道、天然气负荷组成。与电力系统类似,天然气系统的运行约束条件包括节点能量平衡约束、天然气潮流约束以及设备运行约束等。考虑综合需求响应和气负荷削减,天然气系统的节点能量平衡约束方程如式(3)所示。天然气潮流约束方程如附录A式(A6)—(A11)所示。设备运行约束方程如附录A式(A12)—(A17)所示。

$$\sum_{j \in G(m)} G_{jt} + \sum_{r(mn) \in G(m)} G_{mn,t} - \sum_{s(mn) \in G(m)} G_{mn,t} + \sum_{r(h) \in G(m)} G_{ht} - \sum_{s(h) \in G(m)} G_{ht} + \sum_{a \in G(m)} G_{at} - \sum_{g \in G(m)} G_{gt} + \sum_s (Q_{st}^{\text{out}} - Q_{st}^{\text{inj}}) = \sum_{d \in G(m)} G_{dt} - \Delta G_{mt} \quad (3)$$

式中: $G(m)$ 为天然气系统中连接到气负荷节点 m 的一系列设备集合; G_{jt} 为时刻 t 下天然气气井 j 的产气量; $G_{mn,t}$ 和 G_{ht} 分别为时刻 t 下天然气管道 mn 和压缩机站 h 所在管道中的天然气潮流; $s(mn)$ 、 $r(mn)$ 和 $s(h)$ 、 $r(h)$ 分别为天然气管道 mn 和压缩机站 h 所在管道的送端节点、受端节点; G_{at} 和 G_{gt} 分别为时刻 t 下P2G设备 a 的天然气产生量和燃气机组 g 的天然气

消耗量; Q_{st}^{inj} 和 Q_{st}^{out} 分别为时刻 t 下储气设备 s 的注入气量和流出气量; G_{dt} 为时刻 t 下考虑需求响应后需求侧可响应负荷节点 d 的天然气消耗量。

1.2.3 耦合设备运行约束条件

电力系统和天然气系统通过P2G设备和燃气机组实现耦合,因此在气电联合系统运行时会受到耦合设备的运行约束。耦合设备的运行约束方程如附录A式(A18)~(A20)所示。

1.2.4 负荷削减量约束条件

电、气负荷削减量受其上下限约束,应保证在系统安全运行的条件下尽可能减小电、气负荷的削减量。电、气负荷削减量约束方程分别如式(4)、(5)所示。

$$0 \leq \Delta P_{et} \leq P_{et}^{\max} \quad (4)$$

$$0 \leq \Delta G_{mt} \leq G_{mt}^{\max} \quad (5)$$

式中: $P_{et}^{\max}$ 为电负荷节点 e 的最大可失电负荷; $G_{mt}^{\max}$ 为气负荷节点 m 的最大可失气负荷。

1.2.5 需求响应约束

需求侧可响应负荷分为可中断负荷和可转移电、气需求响应负荷^[19]。通过电、气负荷综合需求响应,在系统可靠性受威胁时灵活中断一定量负荷或转移负荷的用电时间,能够更好地匹配可再生能源出力,提升系统可靠性,从而保障系统安全稳定运行。

需求侧可响应电负荷分为可中断电负荷和可转移电负荷,如式(6)所示;需求侧可响应电负荷与电负荷预测值关系如式(7)所示;各时刻下需求侧可中断电负荷和可转移电负荷受一定比例限制,如式(8)、(9)所示;需求侧可中断电负荷与可转移电负荷总量分别满足式(10)、(11);需求响应后的电负荷应满足系统最大电负荷约束,如式(12)所示。

$$P_{dt}^{\text{DR}} = P_{dt}^{\text{DR, inter}} + P_{dt}^{\text{DR, shift}} \quad (6)$$

$$P_{dt}^{\text{LD}} = P_{dt}^{\text{DR}} + P_{dt} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{dt}^{\text{DR, inter}} \leq \alpha_t^{\text{P, inter}} P_{dt}^{\text{LD}} \quad (8)$$

$$P_{dt}^{\text{DR, shift}} \leq \alpha_t^{\text{P, shift}} P_{dt}^{\text{LD}} \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_t P_{dt}^{\text{DR, inter}} \leq P^{\text{inter, max}} \quad (10)$$

$$\sum_t P_{dt}^{\text{DR, shift}} = 0 \quad (11)$$

$$P_{dt}^{\text{LD}} - P_{dt}^{\text{DR}} \leq P_{dt}^{\text{LD, max}} \quad (12)$$

式中: P_{dt}^{LD} 、 P_{dt}^{DR} 、 $P_{dt}^{\text{DR, inter}}$ 、 $P_{dt}^{\text{DR, shift}}$ 和 $P_{dt}^{\text{LD, max}}$ 分别为时刻 t 下电负荷预测值、需求侧可响应电负荷、需求侧可中断电负荷、需求侧可转移电负荷以及系统最大电负荷限值, $P_{dt}^{\text{DR, shift}}$ 的值为正、负分别表示转出和转入需求侧的电负荷; $\alpha_t^{\text{P, inter}}$ 和 $\alpha_t^{\text{P, shift}}$ 分别为时刻 t 下可中断和可转移的电负荷比例; $P^{\text{inter, max}}$ 为最大可中断电负荷量。

与需求侧可响应电负荷类似,需求侧可响应气负荷满足约束方程式(13)~(19)。

$$G_{dt}^{\text{DR}} = G_{dt}^{\text{DR, inter}} + G_{dt}^{\text{DR, shift}} \quad (13)$$

$$G_{dt}^{\text{LD}} = G_{dt}^{\text{DR}} + G_{dt} \quad (14)$$

$$0 \leq G_{dt}^{\text{DR, inter}} \leq \alpha_t^{\text{G, inter}} G_{dt}^{\text{LD}} \quad (15)$$

$$G_{dt}^{\text{DR, shift}} \leq \alpha_t^{\text{G, shift}} G_{dt}^{\text{LD}} \quad (16)$$

$$0 \leq \sum_t G_{dt}^{\text{DR, inter}} \leq G^{\text{inter, max}} \quad (17)$$

$$\sum_t G_{dt}^{\text{DR, shift}} = 0 \quad (18)$$

$$G_{dt}^{\text{LD}} - G_{dt}^{\text{DR}} \leq G_{dt}^{\text{LD, max}} \quad (19)$$

式中: G_{dt}^{LD} 、 G_{dt}^{DR} 、 $G_{dt}^{\text{DR, inter}}$ 、 $G_{dt}^{\text{DR, shift}}$ 和 $G_{dt}^{\text{LD, max}}$ 分别为时刻 t 下气负荷预测值、需求侧可响应气负荷、需求侧可中断气负荷、需求侧可转移气负荷以及系统最大气负荷限值, $G_{dt}^{\text{DR, shift}}$ 的值为正、负分别表示转出和转入需求侧的气负荷; $\alpha_t^{\text{G, inter}}$ 和 $\alpha_t^{\text{G, shift}}$ 分别为时刻 t 下可中断和可转移的气负荷比例; $G^{\text{inter, max}}$ 为最大可中断气负荷量。

1.3 泰勒级数展开法

附录A式(A6)描述了考虑天然气潮流方向和天然气管道运行状态的Weymouth潮流约束,但是由于其是非线性的,模型求解较为困难,因此,可以利用泰勒级数展开法对其进行线性化处理,以提高模型的求解效率。设 $y_{mn,t}$ 为时刻 t 下天然气管道 mn 的运行状态, $y_{mn,t}=1$ 表示天然气管道正常运行; $f_{mn,t}^+$ 、 $f_{mn,t}^-$ 为时刻 t 下天然气潮流方向, $f_{mn,t}^+=1$ 表示天然气潮流方向为正,即送端节点气压高于受端节点气压, $f_{mn,t}^-=1$ 表示天然气潮流方向为负,即送端节点气压低于受端节点气压。首先假定天然气管道无故障($y_{mn,t}=1$),在此条件下,在天然气潮流方向为正($f_{mn,t}^+=1$)和天然气潮流方向为负($f_{mn,t}^-=1$)2种情况下进行讨论。

1)当天然气潮流方向为正($f_{mn,t}^+=1$)时,附录A式(A6)可以简化为式(20)。在时刻 t 下气负荷节点 m 和 n 的给定气压($\hat{\pi}_{mt}^+$ 、 $\hat{\pi}_{nt}^+$)处对式(20)进行泰勒级数展开,从而将其表示的非线性方程转化为线性化不等式,如式(21)所示。

$$G_{mn,t} = K_{mn} \sqrt{\pi_{mt}^2 - \pi_{nt}^2} \quad (20)$$

$$G_{mn,t} \leq K_{mn} \sqrt{(\hat{\pi}_{mt}^+)^2 - (\hat{\pi}_{nt}^+)^2} + \frac{\partial G_{mn,t}}{\partial \pi_{mt}} (\pi_{mt} - \hat{\pi}_{mt}^+) + \frac{\partial G_{mn,t}}{\partial \pi_{nt}} (\pi_{nt} - \hat{\pi}_{nt}^+) \quad (21)$$

式中: π_{mt} 和 π_{nt} 分别为时刻 t 下气负荷节点 m 和 n 的气压; K_{mn} 为天然气管道 mn 的Weymouth特性参数。在节点气压上、下限内定义 B 个气压断点,则任意断点 $b(b=1,2,\dots,B)$ 下气负荷节点 m 和 n 的给定气压分别为 $\hat{\pi}_{mt,b}^+$ 和 $\hat{\pi}_{nt,b}^+$,且 $\hat{\pi}_{mt,b}^+ \geq \hat{\pi}_{nt,b}^+$ 。由式(22)~(24)表示的平面与式(20)表示的锥面相切,切点在入口气压 π_{mt} 和出口气压 π_{nt} 的比例与断点 $\hat{\pi}_{mt,b}^+$ 和 $\hat{\pi}_{nt,b}^+$ 的比例相等的线上。从而由式(22)~(24)表示的平面

为式(20)表示的锥面的外部近似。

$$G_{mn,t} \leq K_{mn} \hat{\varphi}_{mn,t,b}^+ \pi_{nt} - K_{mn} \hat{\phi}_{mn,t,b}^+ \pi_{nt} \quad (22)$$

$$\hat{\varphi}_{mn,t,b}^+ = \frac{\hat{\pi}_{nt,b}^+}{\sqrt{(\hat{\pi}_{nt,b}^+)^2 - (\hat{\pi}_{nt,b}^-)^2}} \quad (23)$$

$$\hat{\phi}_{mn,t,b}^+ = \frac{\hat{\pi}_{nt,b}^+}{\sqrt{(\hat{\pi}_{nt,b}^+)^2 - (\hat{\pi}_{nt,b}^-)^2}} \quad (24)$$

2) 当天然气潮流方向为负 ($f_{mn,t}^- = 1$) 时, 式(A6)可以简化为式(25)。同理, 在节点气压上、下限内定义 B 个气压断点, 则任意断点 $b(b=1, 2, \dots, B)$ 下气负荷节点 m 和 n 的给定气压分别为 $\hat{\pi}_{mt,b}^-$ 和 $\hat{\pi}_{nt,b}^+$, 且 $\hat{\pi}_{mt,b}^- < \hat{\pi}_{nt,b}^+$ 。则由式(26)~(28)表示的平面代表了式(25)表示的锥面的外部近似。

$$G_{mn,t} = -K_{mn} \sqrt{\pi_{nt}^2 - \pi_{mt}^2} \quad (25)$$

$$-G_{mn,t} \leq K_{mn} \hat{\varphi}_{mn,t,b}^- \pi_{nt} - K_{mn} \hat{\phi}_{mn,t,b}^- \pi_{nt} \quad (26)$$

$$\hat{\varphi}_{mn,t,b}^- = \frac{\hat{\pi}_{nt,b}^-}{\sqrt{(\hat{\pi}_{nt,b}^-)^2 - (\hat{\pi}_{nt,b}^+)^2}} \quad (27)$$

$$\hat{\phi}_{mn,t,b}^- = \frac{\hat{\pi}_{nt,b}^-}{\sqrt{(\hat{\pi}_{nt,b}^-)^2 - (\hat{\pi}_{nt,b}^+)^2}} \quad (28)$$

由此可得, 考虑天然气潮流方向的 Weymouth 潮流方程可线性化为式(29)、(30)。进一步考虑天然气管道故障, 则可表示为式(31)、(32)。

$$G_{mn,t} \leq K_{mn} \hat{\varphi}_{mn,t,b}^+ \pi_{nt} - K_{mn} \hat{\phi}_{mn,t,b}^+ \pi_{nt} + (1 - f_{mn,t}^+) M \quad (29)$$

$$-G_{mn,t} \leq K_{mn} \hat{\varphi}_{mn,t,b}^- \pi_{nt} - K_{mn} \hat{\phi}_{mn,t,b}^- \pi_{nt} + (1 - f_{mn,t}^-) M \quad (30)$$

$$G_{mn,t} \leq K_{mn} \hat{\varphi}_{mn,t,b}^+ \pi_{nt} - K_{mn} \hat{\phi}_{mn,t,b}^+ \pi_{nt} + (1 - f_{mn,t}^+) M + (1 - \gamma_{mn,t}) M \quad (31)$$

$$-G_{mn,t} \leq K_{mn} \hat{\varphi}_{mn,t,b}^- \pi_{nt} - K_{mn} \hat{\phi}_{mn,t,b}^- \pi_{nt} + (1 - f_{mn,t}^-) M + (1 - \gamma_{mn,t}) M \quad (32)$$

式中: M 为足够大的数。综上所述, 式(31)、(32)代表了考虑天然气潮流方向和天然气管道运行状态的 Weymouth 潮流约束的有效线性近似, 因此, 可用式(31)、(32)替换附录 A 式(A6), 将非线性模型转化为混合整数线性规划模型以便于求解。

2 考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性评估

2.1 可靠性评估指标

传统电力系统可靠性评估指标主要包括系统切负荷概率 LOLP (Loss Of Load Probability)、系统电力不足时间期望 LOLE (Loss Of Load Expectation)、系统电力不足期望值 EENS (Expected Electric Not Supply)。为实现考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性的量化分析, 本文将传统电力系统可靠性评估指标扩展到天然气系统, 提出切气负荷概率、气量不足时间期望、气量不足期望值指标以评估

天然气系统可靠性。各指标具体计算公式^[20]见附录 A 式(A21)~(A26)。此外, 建立需求响应对电力不足期望值贡献系数 CDREE (Contribution of Demand Response to Expected Electric not supply)、需求响应对气量不足期望值贡献系数 CDREG (Contribution of Demand Response to Expected Gas not supply) 指标, 用于刻画需求响应对气电联合系统可靠性的影响, 如式(33)、(34)所示。

$$R_{CDREE} = \frac{R_{EENS_0} - R_{EENS_1}}{R_{EENS_0}} \quad (33)$$

$$R_{CDREG} = \frac{R_{EGNS_0} - R_{EGNS_1}}{R_{EGNS_0}} \quad (34)$$

式中: R_{CDREE} 和 R_{CDREG} 分别为需求响应对电力以及气量不足的期望值贡献系数; R_{EENS_0} 和 R_{EENS_1} 分别为考虑需求响应前、后的系统电力不足期望值; R_{EGNS_0} 和 R_{EGNS_1} 分别为考虑需求响应前、后的系统气量不足期望值。

2.2 可靠性评估方法

基于本文所建立的负荷削减优化模型和可靠性评估指标, 利用序贯蒙特卡洛模拟法评估考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性。具体评估步骤如下:

1) 输入气电联合系统及其元件参数数据, 初始化系统元件状态参数;

2) 使用序贯蒙特卡洛模拟法在大量抽样年内对系统元件(机组、输电线路、气井、天然气管道等)进行状态抽样, 得到系统元件状态和状态持续时间;

3) 初始化模拟年数 ($z=1$);

4) 选取一个典型日, 根据模拟的系统每小时元件状态, 利用所建负荷削减优化模型求解该典型日每小时的负荷削减状态和最优负荷削减量;

5) 根据优化模型求解结果和所提可靠性评估指标, 计算该年系统可靠性指标, 并令 $z=z+1$;

6) 若模拟年数达到设定的蒙特卡洛模拟时长或可靠性指标方差系数小于设定门槛值, 则进入步骤7), 否则转至步骤4);

7) 统计计算气电联合系统的可靠性指标。

3 算例分析

3.1 算例概况

为验证本文所提可靠性评估方法的有效性, 本节以 IEEE 24-NGS 12 气电联合系统为例, 进行仿真分析。该气电联合系统由修改的 IEEE 24 节点电力系统和 12 节点天然气系统耦合而成。其中, 修改的 IEEE 24 节点电力系统包含 19 台非燃气机组、7 台燃气机组、38 条输电线路以及 17 个电力负荷, 电峰荷电力系统最大负荷为 2850 MW; 燃气机组 1—4

连接电力系统节点1,由天然气系统节点11供气,燃气机组5连接电力系统节点21,由天然气系统节点5供气,燃气机组6、7连接电力系统节点23,由天然气系统节点12供气;在节点1、2接入容量为200 MW的风电场,同时配置容量为100 MW的P2G设备,在节点22接入容量为300 MW的风电场,同时配置容量为150 MW的P2G设备;P2G设备产生的天然气由节点5、8、11注入天然气系统。

12节点天然气系统包含3个天然气气井、8条天然气管道、2座压缩机站、1台储气设备以及8个天然气负荷,气峰荷天然气系统最大负荷为254 700 m³;储气设备位于天然气系统节点12,该节点的最大注入气量和流出气量之差为14 150 m³/h,最大储气容量为113 200 m³。此外,本文元件停运模型采用两状态模型^[3],更加详细的气电联合系统参数参考文献[21]。

3.2 泰勒级数展开法的精度分析

通过泰勒级数展开法将Weymouth天然气潮流方程线性化,可能会存在误差。为了验证本文所提出的泰勒级数展开法线性化近似的有效性,定义最大相对误差指标 $\beta_{mn,t}^{error}$ 来评估泰勒级数展开法的外部近似精度,如式(35)所示。

$$\beta_{mn,t}^{error} = \left| \frac{G_{mn,t}^2 - K_{mn}^2 |\pi_{mt}^2 - \pi_{nt}^2|}{G_{mn,t}^2} \right| \quad (35)$$

由式(35)可以看出,若给定的气压断点与实际求得的节点气压足够接近,则能保证泰勒级数展开法的最大相对误差足够小。因此,通过设置不同的气压断点数,得到泰勒级数展开法的精度与求解时间如表1所示。分析表1可以得出,一方面,增加气压断点数能够有效减小泰勒级数展开法的最大相对误差,从而提高其外部近似精度;另一方面,增加气压断点数也会牺牲部分求解速度。根据表1,气压断点数为500时较气压断点数为200时求解速度有所下降,而气压断点数为200时的最大相对误差已经足够小,因此,在保证求解精度的前提下,为提高求解效率,设置气压断点数为200。

表1 不同气压断点数下泰勒级数展开法的精度与求解时间

Table 1 Accuracy and solving time of Taylor series expansion method under different numbers of pressure breakpoints

断点数	最大相对误差 / %	求解时间 / s
10	30.981	0.519
50	10.263	0.556
100	1.212	0.693
200	0.097	1.046
500	0.011	3.214
1 000	0.005	8.132

表2给出了利用分段线性化法处理天然气潮流方程的精度与求解时间。与表1对比可以得出,在相同的误差数量级下,分段线性化法的求解效率低于泰勒级数展开法。其中分段数为12时和气压断点数为200时的最大相对误差较为接近,但是分段线性化法求解时间明显较长,当最大相对误差低于0.1%时,泰勒级数展开法在求解速度上具有明显的优势。

表2 分段线性化法的精度与求解时间

Table 2 Accuracy and solving time of piecewise linearization method

分段数	最大相对误差 / %	求解时间 / s
2	8.857	0.701
4	1.439	1.063
10	0.138	8.554
12	0.092	12.316
15	0.045	17.470
20	0.004	29.635

在气压断点数为200的基础上,增大负荷倍数来测试泰勒级数展开法的精度,表3给出了不同负荷增大倍数下泰勒级数展开法的精度对比。由表3可知,当负荷增大倍数较低时,泰勒级数展开法的精度比较稳定;当负荷增大倍数较高(系统重载情况下)时,由于天然气系统输送能力降低,某些节点的气压达到其上限或下限,泰勒级数展开法的精度有所下降,此时需要设置更多的气压断点数来提高泰勒级数展开法的外部近似精度。

表3 不同负荷增大倍数下泰勒级数展开法的精度

Table 3 Accuracy of Taylor series expansion method under different load magnification factors

负荷增大倍数	最大相对误差 / %	负荷增大倍数	最大相对误差 / %
1.0	0.097	1.6	0.248
1.2	0.103	1.8	1.232
1.4	0.087	2.0	1.575

为探究气压断点数对负荷削减优化模型求解结果的影响,本文计算不同气压断点数下的天然气管道潮流以及某典型日气负荷削减量。图1给出了某典型日某时刻不同气压断点数下的天然气管道潮流。由图可知,气压断点数为200时各管道的潮流和气压断点数为500时各管道的潮流较为接近,气压断点数为500时各管道的潮流和气压断点数为1 000时各管道的潮流基本一致,随着气压断点数的增加,模型求得的天然气管道潮流的精确性有所提高。图2给出了不同气压断点数下某典型日的气负荷削减量。由图可知,当气压断点数较少时,泰勒级数展开法的精度较低;当气压断点数达到一定数量后,系统切气负荷量趋于稳定,求解结果精确性较

高。因此,适当增加气压断点数可保证泰勒级数展开法的精度,进而能够保证模型求解结果的精确性。

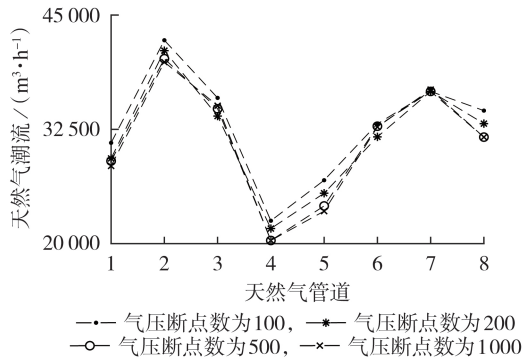


图1 不同气压断点数下的天然气管道潮流

Fig.1 Natural-gas flow of pipeline with different numbers of pressure breakpoints

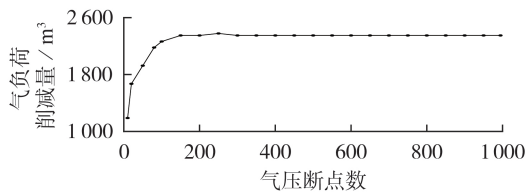


图2 不同气压断点数下某典型日气负荷削减量

Fig.2 Typical daily natural-gas load shedding amount with different numbers of pressure breakpoints

此外,为进一步分析泰勒级数展开法的精度对系统可靠性指标的影响,在不考虑需求响应的前提下,设置不同的气压断点数,得到系统切电、气负荷概率指标(R_{LOELP} 、 R_{LOGLP})的变化趋势如图3所示。由图可知,系统切负荷概率指标对泰勒级数展开法精度的敏感性存在转折点。在气压断点数低于100时,由于泰勒级数展开法的精度很低,系统切负荷概率指标的精确性较差,当气压断点数达到100,进一步增加断点数,系统切负荷的概率对泰勒级数展开法的精度将不会太敏感,此时,可以认为系统的切负荷概率是精确的。因此,利用系统切负荷概率指标对泰勒级数展开法精度的不敏感性可以实现较少断点数下系统切负荷概率的精确求解,从而有效提高求解效率。

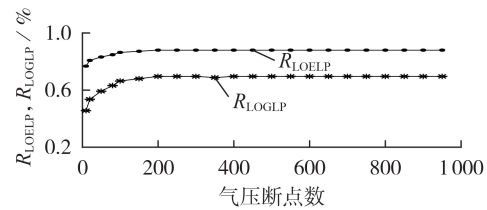


图3 系统切负荷概率指标随气压断点数变化趋势

Fig.3 Tendency of probability indexes of system load shedding with different numbers of pressure breakpoints

3.3 气电联合系统可靠性分析

为探究需求响应对气电联合系统可靠性的影响,本节设置以下7种不同场景:场景①,基础场景,不考虑储气设备、P2G设备以及电、气负荷需求响应;场景②,在场景①的基础上考虑储气设备;场景③,在场景①的基础上考虑P2G设备;场景④,在场景①的基础上同时考虑储气设备和P2G设备;场景⑤,在场景④的基础上考虑电负荷需求响应;场景⑥,在场景④的基础上考虑气负荷需求响应;场景⑦,在场景④的基础上考虑电、气负荷综合需求响应。

各场景下的需求响应比例见附录B表B1。仿真计算不同场景下气电联合系统的切电、气负荷概率指标(R_{LOELP} 、 R_{LOGLP}),系统电力、气量不足时间期望指标(R_{LOELE} 、 R_{LOGLE}),电力、气量不足期望值指标(R_{EENS} 、 R_{EGNS})以及需求响应对电力、气量不足期望值贡献系数指标(R_{CDREE} 、 R_{CDREG}),结果如表4所示。由表可知,以场景①为参考,场景②考虑了储气设备,在气负荷高峰时段供应气负荷需求,提升了天然气系统可靠性。同时,储气设备还可以通过燃气机组间接供应电负荷,因此电力系统可靠性也有所提高。场景③在场景①的基础上考虑了P2G设备,通过将富余风电转化为天然气,一定程度上缓解了气负荷需求,因此系统气负荷削减概率和气负荷削减量均有所减小。可见,P2G设备对系统气负荷具有一定的支撑作用。场景④同时考虑了储气设备和P2G设备,相比于场景②、③,气电联合系统的可靠性得到显著改善。

场景⑤在场景④的基础上考虑了电负荷需求响应,通过在负荷高峰时段中断或转移电负荷,改善了电力系统可靠性。此外,由于电负荷需求响应也在

表4 不同场景下的可靠性评估指标计算结果

Table 4 Calculate results of reliability evaluation indexes under different scenarios

场景	$R_{LOELP} / \%$	$R_{LOGLP} / \%$	$R_{LOELE} / (d \cdot a^{-1})$	$R_{LOGLE} / (d \cdot a^{-1})$	R_{EENS} / MW	R_{EGNS} / m^3	$R_{CDREE} / \%$	$R_{CDREG} / \%$
①	1.19	1.56	4.34	5.69	1715.34	90704.33		
②	1.08	0.82	3.94	2.99	1528.64	70378.70		
③	0.98	1.38	3.58	5.04	1501.73	85839.56		
④	0.85	0.62	3.10	2.26	1279.52	56919.51		
⑤	0.36	0.55	1.31	2.01	1071.49	53638.69	16.26	5.76
⑥	0.81	0.39	2.96	1.42	1108.55	46096.17	13.36	19.02
⑦	0.25	0.14	0.91	0.51	708.98	39009.00	44.59	31.47

一定程度上减少了电力系统对天然气的需求,因此,系统切气负荷概率指标 R_{LOGLP} 和系统气量不足时期望指标 R_{LOGLE} 均有所减小。场景⑥在场景④的基础上考虑了气负荷需求响应,因此系统中 R_{LOGLP} 、 R_{LOGLE} 、 R_{EGNS} 较场景⑤下降更明显,需求响应对气量不足期望值贡献系数指标 R_{CDREG} 从5.76%增加到19.02%,系统切气负荷量明显减小,天然气系统可靠性显著提升。同时,由于气负荷需求响应降低了天然气系统对天然气的需求,从而间接使得燃气机组能够利用更多的气流发电以供应电负荷,因此,场景⑥系统的切电负荷概率和切电负荷量均有所减小,但下降幅度不及场景⑤,需求响应对电力不足期望值贡献系数也低于场景⑤。与场景⑤、⑥相比,场景⑦考虑了电、气负荷综合需求响应,由表4可知,系统切电、气负荷概率和切电、气负荷量相比于单一考虑电、气负荷需求响应更低,综合需求响应对于气电联合系统电力、气量不足期望值的贡献高于单一需求响应贡献的简单叠加。因此,考虑电、气负荷综合需求响应能够有效减小气电联合系统的失负荷量。综上所述,考虑储气设备、P2G设备,以及电、气负荷综合需求响应能够显著提升气电联合系统的可靠性,保证系统的安全运行。

由于场景⑦仍存在电、气负荷削减现象,在场景⑦的基础上进一步提升需求响应比例,得到需求响应对电力、气量不足期望值贡献系数指标的变化情况如图4所示。从图4可以看出,随着电、气负荷需求响应比例的提高,需求响应对电力、气量不足期望值贡献系数相应提高,当需求响应比例达到一定值,需求响应对电力、气量不足期望值贡献系数达到100%,由式(33)、(34)可知,此时系统的 R_{EENS} 、 R_{EGNS} 均为0,系统不会出现负荷削减,若再增大需求响应比例则 R_{CDREE} 、 R_{CDREG} 将维持不变。因此,合理安排需求响应比例,能够有效避免系统出现失负荷现象。

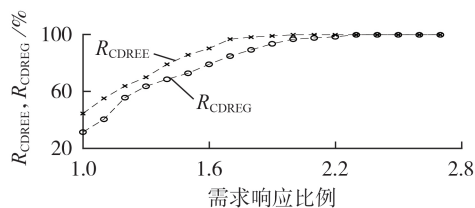


图4 需求响应贡献系数指标随需求响应比例变化趋势

Fig.4 Tendency of contribution coefficient indexes of demand response with different demand response proportions

此外,为测试风电机组所在节点位置对系统可靠性的影响,在场景⑦的基础上,改变位于节点1、2的风电机组位置,得出的可靠性指标计算结果如表5所示。由表可知,风电机组接入位置会影响电力

系统可靠性,但基本不会影响天然气系统可靠性。在节点3、4接入风电机组,系统切电负荷概率指标 R_{LOELP} 和系统电力不足期望值指标 R_{EENS} 最小,系统的可靠性最高。因此,合理选择风电机组的接入节点,能够在一定程度上提升气电联合系统的可靠性。

表5 不同风电机组接入位置下系统的可靠性评估指标

Table 5 Reliability evaluation indexes of system under different connection locations of wind turbine units

风电机组接入位置	$R_{LOELP} / \%$	$R_{LOGLP} / \%$	R_{EENS} / MW	R_{EGNS} / m^3
节点1,2	0.25	0.14	708.98	39009
节点3,4	0.16	0.14	533.61	39009
节点5,6	0.28	0.14	794.47	39009
节点7,8	0.35	0.14	1052.38	39009

4 结论

本文建立了考虑电、气负荷综合需求响应的气电联合系统负荷削减优化模型,提出了考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性评估指标和方法,为提高模型求解效率,利用泰勒级数展开法对约束条件中的天然气潮流方程进行线性化处理。通过算例仿真分析,验证了本文所提模型、指标和方法的有效性。分析算例结果可得如下结论。

1)在相同的求解精度下,泰勒级数展开法的求解效率高于分段线性化法;合理设置泰勒级数展开的气压断点数,既能够保证气电联合系统负荷削减优化模型和可靠性指标的精确求解,又能够有效提高求解效率。

2)电负荷需求响应能在一定程度上改善天然气系统可靠性,气负荷需求响应能在一定程度上改善电力系统可靠性,两者具有互济性;相比单一需求响应,电、气负荷综合需求响应对气电联合系统可靠性指标的改善更显著,能够更有效地提升系统可靠性,保证系统运行安全性。

3)需求响应对系统可靠性的影响与需求响应的比例有关,合理协调各类型负荷需求响应比例、灵活中断和转移各类型负荷对系统的安全运行具有现实意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):1-7.
- [2] 李更丰,黄玉雄,别朝红,等. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):12-21.
LI Gengfeng, HUANG Yuxiong, BIE Zhaohong, et al. Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):12-21.

- [3] 刘文霞,杨粤,李征洲,等.考虑多能流传输与热惰性的综合能源系统序贯模拟可靠性评估[J].电力自动化设备,2020,40(7):10-16.
LIU Wenxia,YANG Yue,LI Zhengzhou,et al. Reliability evaluation of integrated energy system considering multi-energy flow transmission and thermal inertia based on sequential simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(7):10-16.
- [4] 石文辉,别朝红,王锡凡.大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J].中国电机工程学报,2008,28(4):9-15.
SHI Wenhui,BIE Zhaozhong,WANG Xifan. Applications of Markov chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(4):9-15.
- [5] 陈胜,卫志农,孙国强,等.电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6331-6340.
CHEN Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(24):6331-6340.
- [6] 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):59-66.
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):59-66.
- [7] 吕佳伟,张沈习,程浩忠.计及热惯性和运行策略的综合能源系统可靠性评估方法[J].电力系统自动化,2018,42(20):9-16.
LÜ Jiawei,ZHANG Shenxi,CHENG Haozhong. Reliability evaluation of integrated energy system considering thermal inertia and operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(20):9-16.
- [8] 张弛,唐庆华,严玮,等.基于粒子群-内点混合优化算法的区域综合能源系统可靠性评估[J].电力建设,2017,38(12):104-111.
ZHANG Chi,TANG Qinghua,YAN Wei,et al. Reliability evaluation of integrated community energy system based on particle-swarm-interior-point hybrid optimization algorithm[J]. Electric Power Construction,2017,38(12):104-111.
- [9] 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):1293-1304.
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):1293-1304.
- [10] CORREA-POSADA C,SANCHEZ-MARTIN P. Gas network optimization:a comparison of piecewise linear models[EB/OL]. (2014-06-22)[2021-04-16]. http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2014/10/4580.pdf.
- [11] BENT R,BLUMSACK S,VAN HENTENRYCK P,et al. Joint electricity and natural gas transmission planning with endogenous market feedbacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(6):6397-6409.
- [12] 魏震波,魏平桢,郭毅,等.考虑需求侧管理和碳交易的电-气互联网络分散式低碳经济调度[J].高电压技术,2021,47(1):33-47.
WEI Zhenbo,WEI Ping'an,GUO Yi,et al. Decentralized low-carbon economic dispatch of electricity-gas network in consideration of demand-side management and carbon trading[J]. High Voltage Engineering,2021,47(1):33-47.
- [13] SHARAPOV V I,ORLOV M E,KUNIN M V. Reliability analysis of the combined district heating systems[J]. Thermal Engineering,2015,62(14):1012-1016.
- [14] 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.
- [15] 徐箴,孙宏斌,郭庆来.综合需求响应研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7194-7205,7446.
XU Zheng,SUN Hongbin,GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(24):7194-7205,7446.
- [16] 董晓晶,刘洪,宫建锋,等.考虑多类型综合需求响应的电热耦合能源系统可靠性评估[J].电力建设,2018,39(11):10-19.
DONG Xiaojing,LIU Hong,GONG Jianfeng,et al. Reliability assessment of coupled electricity-heat energy system considering multi-type integrated demand response[J]. Electric Power Construction,2018,39(11):10-19.
- [17] 刘天琪,张琪,何川.考虑气电联合需求响应的气电综合能源配网系统协调优化运行[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1664-1677.
LIU Tianqi,ZHANG Qi,HE Chuan. Coordinated optimal operation of electricity and natural gas distribution system considering integrated electricity-gas demand response[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(5):1664-1677.
- [18] 路红池,谢开贵,王学斌,等.计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估[J].电力自动化设备,2019,39(8):72-78.
LU Hongchi,XIE Kaigui,WANG Xuebin,et al. Reliability assessment of multi-energy system considering multi-storage and integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):72-78.
- [19] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等.基于综合需求响应和主从博弈的微网综合能源系统优化调度策略[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1307-1321,1538.
LI Peng,WU Difan,LI Yuwei,et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(4):1307-1321,1538.
- [20] 张巍峰.基于蒙特卡洛法的电力系统可靠性评估算法研究[D].天津:天津大学,2014.
ZHANG Weifeng. Research on power system reliability evaluation based on Monte Carlo simulation[D]. Tianjin:Tianjin University,2014.
- [21] HE C,LIU T Q,WU L,et al. Robust coordination of interdependent electricity and natural gas systems in day-ahead scheduling for facilitating volatile renewable generations via power-to-gas technology[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2017,5(3):375-388.

作者简介:



龚凌霄

龚凌霄(1997—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统可靠性评估(E-mail:1149288001@qq.com);

刘天琪(1962—),女,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析稳定与控制、高压直流输电、调度自动化等(E-mail:tqliu@scu.edu.cn);

何川(1988—),男,四川眉山人,副教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源系统(E-mail:he_chuan@scu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Reliability evaluation of integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response

GONG Lingxiao¹, LIU Tianqi¹, HE Chuan¹, NAN Lu¹, SU Xueneng², HU Xiaotong³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610094, China;

3. Dispatching and Control Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610094, China)

Abstract: The integrated electricity and natural-gas system is an important part of energy internet, and its reliability evaluation is of great significance to the safe operation of the system. Therefore, a reliability evaluation method for integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response is proposed. Firstly, a load shedding optimal model of integrated electricity and natural-gas system is established, and the Taylor series expansion method is used to linearize the natural-gas flow constraint functions considering the direction of natural-gas flow and the state of natural-gas pipelines. Secondly, the electricity and natural-gas load considering the integrated demand response is introduced to improve reliability of the system, and the interruptible and transferable electricity and natural-gas demand response load is modeled. Then, the reliability evaluation indexes of the integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response are proposed. Based on the system state obtained by using the sequential Monte Carlo simulation method, the reliability of the integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response is evaluated. Finally, the calculation example of IEEE 24-bus and NGS 12-node integrated electricity and natural-gas system is analyzed, which evaluates the reliability of the integrated electricity and natural-gas system under seven different kinds of scenarios, and the simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: integrated electricity and natural-gas system; reliability evaluation; load shedding; Taylor series expansion method; integrated demand response

(上接第23页 continued from page 23)

Resilience of power system with integrated energy in context of low-carbon energy transition: review and prospects

ZHAO Yuehao¹, LI Zhiyi¹, JU Ping^{1,2}, WANG Chong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: At present, power system is transforming into a clean and low-carbon power system with integrated energy. The output power of renewable energy is intermittent and stochastic, which has an adverse effect on the power system with integrated energy. Besides, the large disturbance in single energy subsystem caused by extreme events may create cascading failure in the whole power system with integrated energy. In order to enhance the ability of power system with integrated energy to withstand and cope with extreme events, the related research for resilience evaluation and improvement is becoming more and more important. Firstly, the concept of the resilience of power system with integrated energy is introduced. Then the resilience evaluation index and operation state analysis method are analyzed and summarized. In addition, the resilience promotion measures are studied and prospected from the perspective of multi technology integration. Finally, the problems and challenges of related research are described and analyzed.

Key words: power system with integrated energy; extreme events; resilience analysis; resilience enhancement

附录 A

1 部分电力系统约束

1) 传输线路约束。

电力系统输电网络可以通过直流潮流法来模拟，由于输电线路的传输容量有一定的限制，故能通过潮流受到上下界的限制，如式(A1)所示；输电线路上的潮流由节点的相角差和线路的阻抗决定，如式(A2)所示；电负荷节点相角受到其上下界的限制，如式(A3)所示。

$$-P_l^{\max} y_{lt} \leq P_{lt} \leq P_l^{\max} y_{lt} \quad (A1)$$

$$-(1-y_{lt})M \leq P_{lt} x_l - (\theta_{s(l)t} - \theta_{r(l)t}) \leq (1-y_{lt})M \quad (A2)$$

$$\theta_e^{\min} \leq \theta_{et} \leq \theta_e^{\max} \quad (A3)$$

其中， $P_l^{\max}$ 为输电线路 l 最大的潮流限值； y_{lt} 为时刻 t 下输电线路 l 的工作状态； M 为足够大的数； $\theta_{s(l)t}$ 和 $\theta_{r(l)t}$ 分别为时刻 t 下输电线路 l 送端节点和受端节点的相角； x_l 为输电线路 l 的电抗； θ_{et} 为时刻 t 下电负荷节点 e 的相角； $\theta_e^{\min}$ 和 $\theta_e^{\max}$ 分别为电力系统母线 e 相角最小和最大限值。

2) 机组运行约束。

电力系统中的非燃气常规机组和燃气机组的出力受其最大、最小容量的限制，如式(A4)、(A5)所示。

$$P_c^{\min} y_{ct} \leq P_{ct} \leq P_c^{\max} y_{ct} \quad (A4)$$

$$P_g^{\min} y_{gt} \leq P_{gt} \leq P_g^{\max} y_{gt} \quad (A5)$$

其中， y_{ct} 和 y_{gt} 分别为时刻 t 下非燃气常规机组 c 和燃气机组 g 的工作状态； $P_c^{\min}$ 和 $P_c^{\max}$ 分别为非燃气常规机组 c 出力的最小限值和最大限值； $P_g^{\min}$ 和 $P_g^{\max}$ 分别为燃气机组 g 出力的最小限值和最大限值。

2 部分天然气系统约束

1) 天然气潮流约束。

考虑天然气潮流方向和天然气管道运行状态的 Weymouth 天然气潮流方程如式(A6)—(A8)所示；与电力潮流类似，天然气潮流有最大流量限制，综合考虑天然气潮流方向和天然气管道运行状态后，天然气的潮流最大流量限制如式(A9)、(A10)所示；天然气系统的节点气压受其上下界的限制，如式(A11)所示。

$$-(1-y_{mn,t})M \leq G_{mn,t} - (f_{mn,t}^+ - f_{mn,t}^-) \quad (A6)$$

$$K_{mn} \sqrt{|\pi_{mt}^2 - \pi_{nt}^2|} \leq (1-y_{mn,t})M$$

$$f_{mn,t}^+ + f_{mn,t}^- = 1 \quad (A7)$$

$$-(1-f_{mn,t}^+)M \leq \pi_{mt} - \pi_{nt} \leq (1-f_{mn,t}^-)M \quad (A8)$$

$$-(1-f_{mn,t}^+)G_{mn}^{\max} \leq G_{mn,t} \leq (1-f_{mn,t}^-)G_{mn}^{\max} \quad (A9)$$

$$-y_{mn,t}G_{mn}^{\max} \leq G_{mn,t} \leq y_{mn,t}G_{mn}^{\max} \quad (A10)$$

$$\pi_m^{\min} \leq \pi_{mt} \leq \pi_m^{\max} \quad (A11)$$

其中， $y_{mn,t}$ 为时刻 t 下天然气管道 mn 的运行状态， $y_{mn,t}=1$ 表示天然气管道正常运行； $f_{mn,t}^+$ 、 $f_{mn,t}^-$ 为时刻 t 天然气潮流方向， $f_{mn,t}^+=1$ 表示天然气潮流方向为正，即送端节点气压高于受端节点气压； π_{mt} 和 π_{nt} 分别为时刻 t 天然气节点 m 和 n 的气压； K_{mn} 为天然气管道的 Weymouth 特性参数； $G_{mn}^{\max}$ 为天然气管道最大流量； $\pi_m^{\min}$ 和 $\pi_m^{\max}$ 分别为天然气系统节点 m 的最小和最大气压限值。

2) 气井运行约束。

对于天然气系统而言，天然气井的生产水平受到其物理特性或者合约上下限的限制，如式(A12)所示。

$$G_j^{\min} y_{jt} \leq G_{jt} \leq G_j^{\max} y_{jt} \quad (A12)$$

其中， $G_j^{\max}$ 和 $G_j^{\min}$ 分别为天然气井 j 的生产水平上下限； y_{jt} 为时刻 t 天然气井 j 的工作状态。

3) 储气设备运行约束。

储气设备的运行约束包括储气量的平衡约束如式(A13)所示，储气容量的限制如式(A14)所示，注入气量和流出气量的限制如式(A15)、(A16)所示。

$$E_{st} = E_{s,t-1} + Q_{st}^{\text{out}} - Q_{st}^{\text{inj}} \quad (A13)$$

$$E_s^{\min} \leq E_{st} \leq E_s^{\max} \quad (A14)$$

$$Q_s^{\min} \leq Q_{st}^{\text{inj}} \leq Q_s^{\max} \quad (A15)$$

$$Q_s^{\min} \leq Q_{st}^{\text{out}} \leq Q_s^{\max} \quad (A16)$$

其中， E_{st} 为时刻 t 天然气储气设备 s 的储气量； $E_s^{\min}$ 和 $E_s^{\max}$ 分别为储气设备 s 的最小和最大储气量； $Q_s^{\min}$ 和 $Q_s^{\max}$ 分别为储气设备 s 的最小和最大气流量。

4) 压缩机运行约束。

天然气在管道中的流动是通过相邻节点的气压差实现的。天然气管道中的压缩机能够促进天然气由气压低的节点流向气压高的节点。一种简单的压缩机站模型如式(A17)所示。

$$\pi_{nt} \leq \Gamma_h \pi_{mt} \quad (A17)$$

其中， $\Gamma_h > 1$ 为压缩机站 h 的压缩常数。

3 耦合设备运行约束

1) 电转气设备运行约束。

电转气设备消耗的电功率受其容量的限制，如式(A18)所示。电转气设备的产气量和所消耗的电功率之间的关系如式(A19)所示。

$$0 \leq P_{at} \leq P_a^{\max} y_{at} \quad (A18)$$

$$G_{at} = \lambda P_{at} \eta_a^{P2G} / H_{HHV} \quad (A19)$$

其中， y_{at} 为时刻 t 电转气设备 a 的工作状态； $P_a^{\max}$ 为电转气设备的容量； λ 为能量转换系数，取 $\lambda = \text{MBtu/MW h} / 96.22 \text{ m}^3/\text{MW h}$ ； η_a^{P2G} 为电转气设备的工作效率； H_{HHV} 为天然气高热值，其值取1.026 f。

2) 燃气机组运行约束。

燃气机组消耗天然气与产生电功率的关系如式(A20)所示。

$$G_{gt} = (k_{1,g} (P_{gt})^2 + k_{2,g} P_{gt} + k_{3,g}) / H_{HHV} \quad (A20)$$

其中， $k_{1,g}$ 、 $k_{2,g}$ 、 $k_{3,g}$ 为燃气机组 g 的耗量特性系数。式(A20)为二次函数表达式，可用文献[11]中的方法进行线性化。

4 部分可靠性评估指标

1) 系统切电/气负荷概率指标。

系统切电负荷概率(LOELP)、切气负荷概率(LOGLP)指标用以表示系统出现电负荷或气负荷削减的概率^[4]，如式(A21)、(A22)所示。

$$R_{LOELP} = \sum_{i \in S} p_{ei} \quad (A21)$$

$$R_{LOGLP} = \sum_{i \in U} p_{gi} \quad (A22)$$

其中， p_{ei} 和 p_{gi} 分别为系统在切电负荷、气负荷状态 i 的概率； S 和 U 分别为系统所有切电负荷、气负荷状态的集合。

2) 系统电力/气量不足时间期望指标。

系统电力不足时间期望(LOELE)、气量不足时间期望(LOGLE)指标用以描述系统在被研究的一段时间内电力或气量不足的时间，单位通常取天/a或h/a。可根据系统切负荷概率指标计算得出^[20]，如式(A23)、(A24)所示。

$$R_{LOELE} = 8760 R_{LOELP} \quad (A23)$$

$$R_{LOGLE} = 8760 R_{LOGLP} \quad (A24)$$

3) 系统电力/气量不足期望值指标。

系统电力不足期望值(EENS)、气量不足期望值(EGNS)指标用以反映系统在被研究的一段时间内电力或气量不足的期望值。通常研究的是全年系统的电力或气量不足期望值，如式(A25)、(A26)所示。

$$R_{EENS} = \sum_{i \in S} 8760 C_{ei} p_{ei} \quad (A25)$$

$$R_{EGNS} = \sum_{i \in U} 8760 C_{gi} p_{gi} \quad (A26)$$

其中， C_{ei} 和 C_{gi} 分别为系统在切电负荷、气负荷状态 i 对应削减的电、气负荷量。

附录 B

表 B1 不同场景下的需求响应比例

Table B1 Demand response proportion for different scenarios

场景	$\alpha_t^{P,inter}$	$\alpha_t^{P,shift}$	$\alpha_t^{G,inter}$	$\alpha_t^{G,shift}$
①—④				
⑤	0.03	0.05		
⑥			0.03	0.05
⑦	0.03	0.05	0.03	0.05