第 52 卷 第 4 期：1696-1714 高电压技术 Vol.52, No.4: 1696-1714
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251046

台风灾害下计及故障演化的电-气综合能源系统分布式恢复策略

陈筱枫[1]，黄宇轩[1,2]，陈飞雄[1]，邵振国[1]，黄恬浩[1]
（1. 数字能源福建省高校重点实验室(福州大学)，福州 350108;
2. 国网福建省电力有限公司福州供电公司，福州 350108）

摘　要：极端台风灾害对电-气综合能源系统(integrated electricity-gas system，IEGS)的安全运行带来巨大挑战。由于 IEGS 内部日益紧密的能源耦合关系，台风灾害造成电力元件初始开断后，故障将进一步在 IEGS 中演化。对此，该文提出台风灾害下计及故障演化的电-气综合能源系统分布式恢复策略。首先，识别台风应力影响下的电力元件初始开断，并基于主从分裂迭代的输-配潮流计算及 IEGS 减载措施，以计及后续诱发的电力线路过载和电-气耦联故障，提出台风灾害下的 IEGS 故障演化模型。其次，利用 IEGS 中的多种恢复资源及不同能量流的互济作用，构建 IEGS 故障恢复模型。然后，根据边界耦合关系解耦 IEGS 中的输电、配电及天然气网，提出基于自适应一致性交替方向乘子法的调度控制框架，实现各子系统分散实施恢复策略。最后，仿真结果验证了所提方法能够有效考虑台风造成的 IEGS 故障演化过程，仅需交互少量边界信息即可分散实施策略，恢复系统的负荷损失。
关键词：电-气综合能源系统；台风灾害；韧性；交替方向乘子法；负荷恢复

Distributed Recovery Strategy for Integrated Electricity and Gas System Considering Failure Evolution Under Typhoon

CHEN Xiaofeng[1], HUANG Yuxuan[1,2], CHEN Feixiong[1], SHAO Zhenguo[1], HUANG Tianhao[1]
(1. Key Laboratory of Energy Digitalization(Fuzhou University), Fuzhou 350108, China;
2. Fuzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350108, China)

Abstract：Extreme typhoon weather poses significant challenges to the safe operation of integrated electricity-gas system (IEGS). Due to the increasingly close energy coupling relationship within IEGS, faults will further evolve after the initial disconnection of power lines caused by typhoon disasters. This paper proposes a distributed recovery strategy for the integrated electricity-gas system, in which the evolution of faults during typhoon disasters is taken into account. Firstly, the initial disconnection of power lines under the influence of typhoon stress is identified; meanwhile, the subsequent power line overload and electric pneumatic coupling faults are taken into consideration, and an IEGS fault evolution model under typhoon disasters is proposed. Secondly, based on the mutual benefits of various recovery resources and different energy flows, a recovery model for IEGS is constructed. Then, based on the boundary coupling relationship, IEGS is decoupled, and a scheduling control framework based on the consensus-based alternating direction method of multipliers is proposed to achieve decentralized implementation of resilience recovery strategies for each subsystem. Finally, the simulation results verify that the proposed method can be adopted to effectively deal with IEGS failures caused by typhoons, and only a small amount of boundary information interaction is required to implement resilience recovery strategies and restore the loss of load.
Key words：integrated electricity-gas system; typhoon disasters; resilience; alternating direction method of multipliers; load restoration

0　引言

近年来，小概率且高损失(high impact and low probability, HILP)的极端台风天气频发，严重影响了电-气综合能源系统(integrated electricity-gas system，IEGS)的安全运行[1]。随着能源交互的日益深化，台风诱发 IEGS 初始故障后，故障将进一步发生演化，加剧系统受灾规模扩大的风险[2-3]。为减少台风灾害造成的损失，亟需制定有效的 IEGS 恢复

基金资助项目：国家自然科学基金(52107080)；福建省财政厅项目(83024147)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52107080), Fujian Provincial Department of Finance (83024147).

策略。

当前，不少学者已经针对台风灾害对能源系统的影响展开了相关研究。文献[4]根据台风预测信息筛选电网元件受应力影响下的故障场景，并基于此场景制定恢复调度方案；文献[5]构建考虑时空特性的台风路径及风场模型，进而分析台风造成的配电网倒杆和断线；文献[6]构建台风风场和台风参数概率模型，从而计算架空输电线路物理开断的故障概率；文献[7]模拟台风的风速和风向，刻画配电网受台风应力影响造成的断线及倒塔；文献[8]提出机理和数据融合的台风建模方法，以表征台风灾害的强度；文献[9]考虑台风风速的应力作用，模拟生成配电网的断线场景；文献[10]基于台风的风速等信息要素，分析台风造成线路等电网设备的损伤与故障。上述文献对台风本体灾害进行了相关建模，重点关注台风应力造成的电力元件故障，却忽视了故障后续诱发的 IEGS 故障演化过程。实际中，台风造成电力元件初始故障后，将引起电力线路过载和电-气耦联故障。然而，台风灾害造成电-气综合能源系统故障演化的过程尚未明晰，若无法准确掌握台风灾害造成的 IEGS 故障，将导致恢复策略的制定存在偏差，造成能源和经济损失。

除准确掌握灾害下的系统故障情况外，如何有效制定系统恢复策略也至关重要。文献[11]引入恢复指标优化故障下的保底电网骨干网架，提高了复电效率和成功率；文献[12]构建输电网两阶段韧性提升模型，通过灾前规划和灾中响应提升输电系统韧性；文献[13]以风电预测信息为基础，提出基于滚动机制的双层优化策略，有效恢复输电网故障；文献[14-15]通过调度维修队及网架重构等韧性资源，有效恢复配电网的负荷损失。聚焦于台风灾害；文献[16]提出基于多流融合的配电网数据驱动恢复方法，提高了恢复结果的鲁棒性；文献[4-9]所提策略调度恢复资源，提升了台风灾害下的输、配电网韧性。上述文献均以电力子系统作为对象，为后续研究提供了借鉴。实际中，电-气不同能量流的互济作用在恢复过程中不容忽视，且台风侵袭电-气综合能源系统诱发的故障在物理、时序上具有紧密关联性。然而，现有针对台风灾害下 IEGS 恢复策略的研究还存在一定匮乏。文献[17-18]研究了台风灾害下 IEGS 的负荷恢复及资源部署策略，但并未考虑台风灾害下的 IEGS 故障演化过程，且均构建稳态天然气网络模型，忽视了气网管道储气对系统恢复的作用，难以充分挖掘系统恢复潜力。据此，应协同电-气不同能量流并充分利用 IEGS 中的多种恢复资源，对台风灾害下的 IEGS 恢复策略展开研究。

此外，在制定 IEGS 恢复策略时，如何调度分属不同运营商的子系统，值得深入探讨。文献[19]提出一种电-气-热系统的韧性评估方法，分析了不同子系统在极端场景下的相互依赖性；文献[20]提出一种基于多能协同的负荷恢复策略，有效降低极端天气下的系统负荷损失；文献[21]利用多级储备提高电-气系统抵御极端灾害的能力；文献[22]计及新能源间歇性，提出考虑负荷转供的输配协同供电恢复模型，有效降低了系统切负荷量。上述文献所提恢复策略主要基于集中式框架进行调度控制，在制定及实施策略时需上传系统的全局信息。实际极端灾害下，不同子系统存在行业、资源及信息壁垒，无法共享私有信息[23-24]、难以集中实施恢复策略。同时，由于 IEGS 规模巨大，集中式调度面临通信负担重，传输信息量大，单点故障危害高等问题[25]。而分布式调度框架仅需传递子系统间的少量边界信息，即可分散实施恢复策略，对数据通讯要求较低。交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers，ADMM)是典型的分布式算法，具有收敛性好、求解精度高等优点[26]。然而，当 ADMM 算法中可分离算子的数量超过 2 时，将无法保证算法严格收敛[27]，且为及时更新调整策略以应对极端灾害，传统 ADMM 算法的求解效率有待提高。

综上，为应对台风灾害下的 IEGS 故障演化，并在 IEGS 存在多“壁垒”的情况下充分挖掘韧性资源、恢复系统负荷损失，本文提出一种台风灾害下计及故障演化的电-气综合能源系统分布式恢复策略。首先，识别台风灾害下的电力元件初始开断，并基于主从分裂迭代的输-配潮流计算及 IEGS 减载措施，计及后续诱发的电力线路过载和电-气耦联故障，提出台风灾害下的 IEGS 故障演化模型。其次，利用电-气不同能量流及 IEGS 中的多种恢复资源，提出 IEGS 故障恢复模型。进一步，根据边界耦合关系解耦 IEGS，在仅交互少量边界信息的情况下，基于自适应一致性交替方向乘子法(consensus-based alternating direction method of multipliers，C-ADMM)对 IEGS 故障恢复模型进行分布式求解，制定各子系统分散实施的恢复策略。最后，通过算例验证所提方法的有效性和准确性。

1 台风灾害下的电-气综合能源系统故障演化过程

随着路径和风圈的不断发展，台风的高风速和重荷载会带来强大的机械应力，造成地表输、配电网的电力元件发生初始故障开断。此类故障是台风对 IEGS 的初步扰动，本文称为“初始开断”。

而后，IEGS 中将进一步发生故障演化：“初始开断”造成的系统拓扑改变将引发潮流转移，进而导致部分线路潮流过载。线路潮流过载又分为严重过载和一般过载，系统会在极短时间内对严重过载线路进行保护开断，进一步改变了系统拓扑。由于电能的传输速度接近光速，而天然气仅约为 10 m/s。因此，在电力线路严重过载并发生保护开断的瞬时过程中，天然气网的状态几乎没有大的变化[28]。严重过载线路保护开断后，为消除一般过载线路的安全隐患并维持功率平衡，系统需采取减载措施。

相较于短时间尺度内严重过载线路的保护开断，系统实施减载控制需消耗一定时间[28]，应考虑天然气网络所受到的扰动影响。线路开断及系统减载后，可能导致电驱动耦合设备退出运行，引发电-气耦联故障。因此，即使台风是地表灾害，仍能影响深埋地底的天然气网络。例如，当电驱动压缩机(power compressor，PC)退出运行时，会造成天然气管道严重失压，导致气流堵塞，影响气负荷节点的天然气供应。进一步，天然气网络可能会减少对电力系统的供能支持，影响子系统间的韧性互济。

综上，本文考虑台风灾害下的 IEGS 故障演化如图 1 所示，包括：电力元件“初始开断”、电力线路过载和电-气耦联故障。

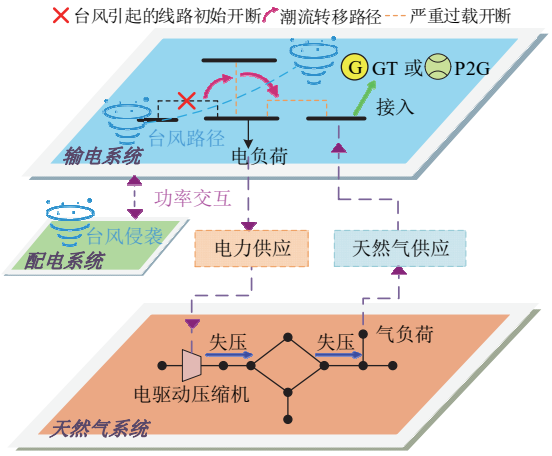


图 1 台风灾害下的 IEGS 故障演化过程

Fig.1 Evolution process of IEGS faults caused by typhoon

2 台风灾害下的 IEGS 故障演化模型

本章基于前述台风灾害下的 IEGS 故障演化过程，构建 IEGS 故障演化模型：首先，考虑台风风速和雨荷载带来的机械应力影响，识别电力元件的“初始开断”；其次，基于主从分裂的潮流计算方法识别过载的输、配电网线路，对严重过载线路执行保护切除；最后，为消除一般过载线路的安全隐患及维持系统功率平衡，构建计及能流传输速度差异的 IEGS 减载模型，实施减载措施。此外，通过所提 IEGS 故障演化模型获取电-气耦合设备及 IEGS 的运行状态，识别电-气耦联故障的影响。

2.1 台风灾害下的电力元件“初始开断”模型

台风在沿着中心眼旋转的同时，以一定速度进行移动，可通过模拟台风旋转的对称风场和移动路径来建模台风灾害模型，详见附录 A。此外，相关研究表明：台风对架空线路和杆塔造成的破坏最为显著[29]，因此本文着重考虑断线及倒塔的情况。

除强力风荷载外，台风的雨荷载也会对系统杆塔施加应力。对此，本文综合考虑台风的风、雨荷载，通过计算等效风速以量化荷载的应力影响[29]：

$$V_{10,z,t}^{\mathrm{equ}} = V_{10,z,t} + a_{\mathrm{equ}}(H_{z,t})^{b_{\mathrm{equ}}}(\exp(c_{\mathrm{equ}}V_{10,z,t}) - d_{\mathrm{equ}}\exp(e_{\mathrm{equ}}V_{10,z,t})) \tag{1}$$

式中：$V_{10,z,t}^{\mathrm{equ}}$ 为 t 时刻 10 m 高处杆塔 z 的等效风速；$V_{10,z,t}$ 为 t 时刻 10 m 高处杆塔 z 前一刻的平均风速；$H_{z,t}$ 为杆塔 z 处在 t 时刻前一刻的平均降雨量；a_{equ}、b_{equ}、c_{equ}、d_{equ}、e_{equ} 为等效系数。

假定杆塔的脆弱性符合正态分布，利用式(1)的等效风速可计算 t 时刻杆塔 z 的故障率 $R_{z,t}$ 为：

$$R_{z,t} = \frac{1}{\sigma_{z,t}\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} \mathrm{e}^{\frac{-(t-\mu_{z,t})^2}{2\sigma_{z,t}^2}}\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：$\sigma_{z,t}$ 和 $\mu_{z,t}$ 为杆塔 z 在 t 时刻时等效风速的标准差和平均值；x 为 t 时刻所对应的 $\ln(V_{10,z,t}^{\mathrm{equ}})$。

除杆塔外，架空线路也将直接受到台风侵袭。可计算架空线路时变故障率 $\lambda_{ij,t}$ 为：

$$\lambda_{ij,i} = L_{ij}\exp\left(\frac{a_{ij}V_{ij,t}}{V_{\mathrm{des}}} + \frac{\beta_{ij}H_{ij,t}}{H_{\mathrm{des}}} + \gamma_{ij}\right) \tag{3}$$

式中：L_{ij} 为线路 ij 长度；α_{ij}、β_{ij} 和 γ_{ij} 为相关系数；$V_{ij,t}$ 和 V_{des} 分别为线路 ij 在 t 时刻前一时段内的平均风速和风速设计值；$H_{ij,t}$ 和 H_{des} 分别为线路 ij 在 t 时刻前一时段内的平均降雨量和降雨量设计值。

根据马尔可夫过程求解架空线路故障率 $R_{ij,t}$：

$$R_{ij,t}=(1-R_{ij,t-1})(1-\exp(-\lambda_{ij,t}t)+R_{ij,t-1}) \tag{4}$$

杆塔倒塌将引发整条线路失效，结合上述杆塔和架空线路的故障概率，综合计算得到系统总线路故障概率 $R_{\mathrm{all},ij,t}$ 为：

$$R_{\mathrm{all},ij,t}=1-(1-R_{z,t})(1-R_{ij,t}) \tag{5}$$

最后，结合蒙特卡洛抽样和系统信息熵的方法[30]，确定电力元件的故障状态，得到系统“初始开断”情况。系统信息熵方法能够根据单一事件概率来选取合理状态场景，所选取的故障场景具有发生概率较大、故障后果影响严重的特点。

2.2 输-配电网的线路过载保护开断模型

本节考虑极短时间尺度内，电力潮流转移引发的严重过载线路保护开断。在此瞬时过程中，可认为天然气网络近乎未发生变化[31]。

“初始开断”后，电力潮流发生转移。部分线路的传输功率大幅变化，可能过载并触发保护装置动作，线路严重过载的保护开断模型如下式所示：

$$p=\begin{cases}p_0, & 0\le P_{ij}\le \overline{P_{ij}}\\ p_0+\dfrac{(1-p_0)(P_{ij}-\overline{P_{ij}})}{P_{ij}^{\max}-\overline{P_{ij}}}, & \overline{P_{ij}}<P_{ij}<P_{ij}^{\max}\\ 1, & P_{ij}\ge P_{ij}^{\max}\end{cases} \tag{6}$$

式中：p 为线路 ij 的过载切除概率；p_0 为线路保护发生隐性故障的概率，数值极小；P_{ij} 为支路 ij 的传输功率；$\overline{P_{ij}}$ 和 $P_{ij}^{\max}$ 分别为线路 ij 传输功率的常态限值和极限临界值。

过载线路分为严重过载线路和一般过载线路。严重过载线路的传输功率超出临界极限值，将在极短的时间内被保护切除[32]，而一般过载线路能够通过减载措施消除过载。据此，本节侧重于保护切除严重过载线路，并在 2.3 节中实施系统减载措施。

根据电力系统功率平衡方程，构造输-配电网潮流计算模型，详见附录 A。基于潮流计算结果识别线路过载情况，具体过程如下：

步骤 1：根据 2.1 节的计算结果设置电力系统的“初始开断”情况。

步骤 2：更新输-配电网拓扑。

步骤 3：设置输-配电网的功率交互节点，以主从分裂的迭代形式计算输-配电网潮流。

步骤 4：根据输-配电网的潮流分布结果，将线路潮流与其极限临界值进行对比，识别严重过载线路。若存在则执行保护切除后返回步骤 2，反之则结束迭代，输出结果。

2.3 IEGS 减载措施

严重过载线路保护切除后，一般过载线路能够通过减载措施以消除过载。此外，为处理线路开断产生的不平衡功率[33]，亟需实施减载措施。据此，本节构建 IEGS 减载模型。考虑到电能和气流的传输速度差异，输电网及配电网采用稳态模型，而天然气网络采用动态模型。

2.3.1 目标函数

以最小化负荷损失量为目标，如下式所示：

$$\min C_{\mathrm{T}}P_{\mathrm{T,loss}}+C_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{D,loss}}+C_{\mathrm{L}}F_{\mathrm{L,loss}} \tag{7}$$

$$P_{\mathrm{T,loss}}=\sum_{t=1}^{T}\Big(\sum_{i\in\Omega_{\mathrm{TE}}}(1-\lambda_{\mathrm{T},i,t})\cdot P_{\mathrm{T},i,t}\Big) \tag{8}$$

$$P_{\mathrm{D,loss}}=\sum_{t=1}^{T}\Big(\sum_{m\in\Omega_{\mathrm{DE}}}(1-\lambda_{\mathrm{D},m,t})\cdot P_{\mathrm{D},m,t}\Big) \tag{9}$$

$$F_{\mathrm{L,loss}}=\sum_{t=1}^{T}\Big(\sum_{p\in\Omega_{\mathrm{G}}}(1-\lambda_{\mathrm{L},p,t})\cdot F_{\mathrm{L},p,t}\Big) \tag{10}$$

式中：$P_{\mathrm{T,loss}}$、$P_{\mathrm{D,loss}}$ 和 $F_{\mathrm{L,loss}}$ 分别为输、配电网和气网的负荷损失；C_{T}、C_{D} 和 C_{L} 分别为输、配电网和气网中的负荷损失成本系数；$\lambda_{\mathrm{T},i,t}$、$\lambda_{\mathrm{D},m,t}$ 和 $\lambda_{\mathrm{L},p,t}$ 分别为输、配电网和气网的负荷剩余率，大小为 0 至 1，反映负荷剩余情况；$P_{\mathrm{T},i,t}$、$P_{\mathrm{D},m,t}$ 和 $F_{\mathrm{L},p,t}$ 分别为输、配电网和气网的负荷；Ω_{TE}、Ω_{DE} 和 Ω_{G} 分别为输、配电网和气网的节点集。

2.3.2 约束条件

输电网侧，为计及输-配电网交互的无功影响，采用线性化的交流潮流模型式(11)。此外，约束包括：机组出力约束式(12)、机组爬坡约束式(13)、分布式电源约束式(14)、功率平衡约束式(15)和安全约束式(16)。

$$\begin{cases}-M(1-Z_{\mathrm{T},ij,t})\le P_{ij,t}-G_{ij}(U_{i,t}-U_{j,t})+\\ \quad B_{ij}(\theta_{i,t}-\theta_{j,t})\le M(1-Z_{\mathrm{T},ij,t})\\ -M(1-Z_{\mathrm{T},ij,t})\le Q_{ij,t}+B_{ij}(U_{i,t}-U_{j,t})+\\ \quad G_{ij}(\theta_{i,t}-\theta_{j,t})\le M(1-Z_{\mathrm{T},ij,t}),\ \ i,j\in\Omega_{\mathrm{TE}}\end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G},i,t}^{\min}\le P_{\mathrm{G},i,t}\le P_{\mathrm{G},i,t}^{\max}\\ Q_{\mathrm{G},i,t}^{\min}\le Q_{\mathrm{G},i,t}\le Q_{\mathrm{G},i,t}^{\max}\end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases}-R_{\mathrm{D},i}^{\mathrm{PG}}\le P_{\mathrm{G},i,t}-P_{\mathrm{G},i,t-1}\le R_{\mathrm{U},i}^{\mathrm{PG}}\\ -R_{\mathrm{D},i}^{\mathrm{QG}}\le Q_{\mathrm{G},i,t}-Q_{\mathrm{G},i,t-1}\le R_{\mathrm{U},i}^{\mathrm{QG}}\end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases}0\le P_{\mathrm{DG},i,t}^{\mathrm{get}}\le P_{\mathrm{DG},i,t}\\ Q_{\mathrm{DG},i,t}=\tan w\cdot P_{\mathrm{DG},i,t}\end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G},i,t}+P_{\mathrm{DG},i,t}+P_{\mathrm{GT},i,t}-P_{\mathrm{P2G},i,t}-\lambda_{\mathrm{T},i,t}\cdot P_{\mathrm{T},i,t}-P_{\mathrm{C,i,t}}=\sum_{j\in\Omega_i}P_{ij,t}\\ Q_{\mathrm{G},i,t}+Q_{\mathrm{DG},i,t}-\lambda_{\mathrm{QT},i,t}\cdot Q_{\mathrm{T},i,t}=\sum_{j\in\Omega_i}Q_{ij,t}\end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} -Z_{\mathrm{T},ij,t}P_{ij,\max} \le P_{ij,t} \le Z_{\mathrm{T},ij,t}P_{ij,\max} \\ -M(1-Z_{\mathrm{T},ij,t})+\theta_{ij,\min} \le \theta_{i,t}-\theta_{j,t} \le \\ \qquad M(1-Z_{\mathrm{T},ij,t})+\theta_{ij,\max},\ \theta_{\mathrm{ref},t}=0 \\ U_{i,\min} \le U_{i,t} \le U_{i,\max},\ U_{\mathrm{ref},t}=U_0 \\ 0 \le \lambda_{\mathrm{T},i,t} \le 1 \end{cases} \tag{16}$$

式中：M 为一个足够大的正数；B_{ij} 和 G_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的互电纳和互电导；$\theta_{i,t}$ 为节点 i 的相角；$U_{i,t}$ 为节点 i 的电压；$Z_{\mathrm{T},ij,t}$ 为表征线路运行状态的二进制变量；$P_{\mathrm{G},i,t}^{\min}$，$P_{\mathrm{G},i,t}^{\max}$ 和 $Q_{\mathrm{G},i,t}^{\min}$，$Q_{\mathrm{G},i,t}^{\max}$ 为火电机组有功无功出力的限值；$R_{\mathrm{D},i}^{\mathrm{PG}}$，$R_{\mathrm{U},i}^{\mathrm{PG}}$ 和 $R_{\mathrm{D},i}^{\mathrm{QG}}$，$R_{\mathrm{U},i}^{\mathrm{QG}}$ 为火电机组滑坡和爬坡的速率上限；$P_{\mathrm{G},i,t}$、$P_{\mathrm{DG},i,t}$ 和 $P_{\mathrm{GT},i,t}$ 分别为火电、分布式电源(distributed generator，DG)和燃气轮机(gas turbine，GT)的发电量；$Q_{\mathrm{G},i,t}$ 和 $Q_{\mathrm{DG},i,t}$ 分别为火电、分布式电源发出的无功功率；w 为分布式电源的功率因数角；$\lambda_{\mathrm{QT},i,t}$ 为输电网无功负荷剩余率，大小为 0 至 1；$Q_{\mathrm{T},i,t}$ 为输电网无功负荷；$Q_{ij,t}$ 为支路 ij 传输的无功功率；$P_{\mathrm{P2G},i,t}$ 和 $P_{\mathrm{C},i,t}$ 分别为电转气设备(power to gas, P2G)和电驱动压缩机的耗电量；$P_{ij,t}$ 和 $P_{ij,t}^{\max}$ 为支路 ij 的传输功率和传输功率上限；Ω_i 为与节点 i 相连的节点的集合；$\theta_{ij,\max}$ 和 $\theta_{ij,\min}$ 为线路 ij 运行的相角差上下限；$U_{\mathrm{ref},t}$ 和 $\theta_{\mathrm{ref},t}$ 为平衡节点的电压和相角。

配电网侧，采用 DistFlow 潮流模型，约束包括：有功无功平衡约束式(17)、负荷削减约束式(18)、支路电压约束式(19)、支路潮流方程式(20)、节点电压约束式(21)、支路电流约束式(22)和支路功率流约束式(23)。

$$\begin{cases} \sum_{n\in b_1}(P_{nm,t}-I_{nm,t}^2 r_{mk}) = \lambda_{\mathrm{D},m,t}P_{\mathrm{D},m,t}+\sum_{k\in b_2}P_{mk,t} \\ \sum_{n\in b_1}(Q_{nm,t}-I_{nm,t}^2 x_{mk}) = \lambda_{\mathrm{D},m,t}Q_{\mathrm{D},m,t}+\sum_{k\in b_2}Q_{mk,t} \end{cases} \tag{17}$$

$$0 \le \lambda_{\mathrm{D},m,t} \le 1 \tag{18}$$

$$\begin{cases} U_{m,t}^2-U_{k,t}^2 \le 2(r_{mk}P_{mk,t}+x_{mk}Q_{mk,t})+ \\ \quad M(1-Z_{\mathrm{D},mk,t})-(r_{mk}^2+x_{mk}^2)\dfrac{(P_{mk,t})^2+(Q_{mk,t})^2}{U_{m,t}^2} \\ U_{m,t}^2-U_{k,t}^2 \ge 2(r_{mk}P_{mk,t}+x_{mk}Q_{mk,t})- \\ \quad M(1-Z_{\mathrm{D},mk,t})-(r_{mk}^2+x_{mk}^2)\dfrac{(P_{mk,t})^2+(Q_{mk,t})^2}{U_{m,t}^2} \end{cases} \tag{19}$$

$$I_{mk,t}^2 = \frac{P_{mk,t}^2+Q_{mk,t}^2}{U_{m,t}^2} \tag{20}$$

$$y_{m,t}\cdot(U_m^{\min})^2 \le U_{m,t} \le y_{m,t}\cdot(U_m^{\max})^2 \tag{21}$$

$$Z_{\mathrm{D},mk,t}\cdot(I_{mk,t}^{\min})^2 \le I_{mk,t} \le Z_{\mathrm{D},mk,t}\cdot(I_{mk,t}^{\max})^2 \tag{22}$$

$$\begin{cases} Z_{\mathrm{D},mk,t}\cdot(P_{mk}^{\min})^2 \le P_{mk,t} \le Z_{\mathrm{D},mk,t}\cdot(P_{mk}^{\max})^2 \\ Z_{\mathrm{D},mk,t}\cdot(Q_{mk}^{\min})^2 \le Q_{mk,t} \le Z_{\mathrm{D},mk,t}\cdot(Q_{mk}^{\max})^2 \end{cases} \tag{23}$$

式中：$P_{mk,t}$，$Q_{mk,t}$ 为从节点 m 流向节点 k 的功率；b_1 和 b_2 分别为末端节点为 m 的支路的初始节点集合和初始节点为 m 的支路的末端节点集合；$Z_{\mathrm{D},mk,t}$ 为表征线路运行状态的二进制变量；$U_{m,t}$ 为节点 m 的电压幅值；$I_{mk,t}$ 为节点 m 流向 k 的电流；r_{mk} 为支路 mk 的电阻；x_{mk} 为支路 mk 的电抗；$y_{m,t}$ 为二进制变量，表征节点工作状态。

其中，式(20)呈非线性。为降低模型求解复杂度，本文分别用变量 $u_{m,t}$ 和 $l_{mk,t}$ 替换 $U_{m,t}^2$ 和 $I_{mk,t}^2$，进一步将式(20)松弛为：

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{mk,t} \\ 2Q_{mk,t} \\ l_{mk,t}-u_{m,t} \end{matrix} \right\| \le l_{mk,t}+u_{m,t} \tag{24}$$

天然气网络侧，基于动态特性建模。约束包括 Weymouth 方程约束式(25)、节点气压约束式(26)、管道流量约束式(27)、气源出力约束式(28)、气压缩机约束式(29)、节点流量平衡约束式(30)和负荷削减约束式(31)及管存约束式(40)。

$$\bar{F}_{pq,t} = \mathrm{sgn}(\bar{F}_{pq,t})W_{pq}\sqrt{\left|(\pi_{p,t})^2-(\pi_{q,t})^2\right|} \tag{25}$$

$$\pi_p^{\min} \le \pi_{p,t} \le \pi_p^{\max} \tag{26}$$

$$-F_{pq}^{\max} \le \bar{F}_{pq,t} \le F_{pq}^{\max} \tag{27}$$

$$F_{\mathrm{G},p}^{\min} \le F_{\mathrm{G},p,t} \le F_{\mathrm{G},p}^{\max} \tag{28}$$

$$\begin{cases} 0 \le F_{\mathrm{C},h,t} \le F_{\mathrm{C},h}^{\max} \\ \tau_{\mathrm{c}}^{\min}\pi_{p,t} \le \pi_{q,t} \le \tau_{\mathrm{c}}^{\max}\pi_{p,t} \end{cases} \tag{29}$$

$$\begin{aligned} F_{\mathrm{G},p,t}+F_{\mathrm{P2G},p,t}-F_{\mathrm{GT},p,t}+\sum_{l\in\Omega_{\mathrm{e},p}}F_{lp,t}^{\mathrm{out}} = \\ \sum_{q\in\Omega_{\mathrm{s},p}}F_{pq,t}^{\mathrm{in}}+\sum_{h\in\Omega_{\mathrm{C},p}}F_{\mathrm{C},h,t}+\lambda_{\mathrm{L},p,t}\cdot F_{\mathrm{L},p,t} \end{aligned} \tag{30}$$

$$0 \le \lambda_{\mathrm{L},p,t} \le 1 \tag{31}$$

式中：$\Omega_{\mathrm{e,p}}$、$\Omega_{\mathrm{s,p}}$ 和 $\Omega_{\mathrm{C,p}}$ 分别为以节点 p 为末节点的首节点集、以节点 p 为首节点的末节点集和以节点 p 为入口的压缩机集；$\bar{F}_{pq,t}$ 为管道 pq 的平均流量；W_{pq} 为管道 pq 的管道常数；$\pi_{p,t}$ 和 $\pi_{q,t}$ 为节点 p 和 q 的气压；$F_{\mathrm{G},p,t}$ 为气源 p 的产气量；$F_{\mathrm{C},h,t}$ 为压缩机管道 h 的流量；$F_{\mathrm{GT},p,t}$、$F_{\mathrm{P2G},p,t}$ 和 $F_{\mathrm{L},p,t}$ 分别为 GT 的耗气量、P2G 的产气量和气负荷；$F_{pq,t}^{\mathrm{in}}$ 和 $F_{lp,t}^{\mathrm{out}}$ 分别为管道 pq 的首端流量和末端流量；$\pi_p^{\max}$ 和 $\pi_p^{\min}$ 为节点 p 的气压限值；$F_{\mathrm{G},p}^{\max}$ 和 $F_{\mathrm{G},p}^{\min}$ 为气源 p 的出力限值；$\tau_{\mathrm{c}}^{\max}$ 和 $\tau_{\mathrm{c}}^{\min}$ 分别为压缩机的压缩因子限值；$F_{pq}^{\max}$ 和

$F_{C,h}^{\max}$ 分别为管道 pq 的流量上限和压缩机管道 h 的流量上限。

区别于日前调度中固定管道流向，在恢复问题中采用双向导通的管道模型，能够让天然气灵活流通，从而满足不同时段的恢复需求。本文结合大 M 法和二阶锥松弛方法处理非凸非线性的式(25)Weymouth 方程。因此，需引入状态变量 $\zeta_{pq,t}$ 代替符号函数 sgn($\bar{F}_{pq,t}$)，$\zeta_{pq,t}$=1 表示 $\bar{F}_{pq,t}\geq 0$，反之 $\zeta_{pq,t}$=0 表示 $\bar{F}_{pq,t}\leq 0$，式(25)等价为：

$$\begin{cases} -M\left(1-\zeta_{pq,t}\right)\leq \bar{F}_{pq,t}\leq M\zeta_{pq,t} \\ -M\left(1-\zeta_{pq,t}\right)\leq \pi_{p,t}-\pi_{q,t}\leq M\zeta_{pq,t} \end{cases} \tag{32}$$

$$\bar{F}_{pq,t}^2/W_{pq}^2=(2\zeta_{pq,t}-1)(\pi_{p,t}^2-\pi_{q,t}^2) \tag{33}$$

引入辅助变量 $u_{p,t}$ 和 $v_{q,t}$，将式(33)转换为：

$$\begin{cases} -M\left(1-\zeta_{pq,t}\right)\leq u_{p,t}-\pi_{p,t}\leq M\left(1-\zeta_{pq,t}\right)\zeta_{pq,t} \\ -M\zeta_{pq,t}\leq u_{p,t}-\pi_{q,t}\leq M\zeta_{pq,t} \\ -M\left(1-\zeta_{pq,t}\right)\leq v_{q,t}-\pi_{q,t}\leq M\left(1-\zeta_{pq,t}\right) \\ -M\zeta_{pq,t}\leq v_{q,t}-\pi_{p,t}\leq M\zeta_{pq,t} \end{cases} \tag{34}$$

$$\bar{F}_{pq,t}^2/W_{pq}^2=(u_{p,t})^2-(v_{q,t})^2 \tag{35}$$

最后，采用二阶锥松弛对式(35)进行处理：

$$\left\| \begin{matrix} \bar{F}_{pq,t}/W_{pq} \\ v_{q,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq u_{p,t} \tag{36}$$

为促使式(36)取等，在目标函数添加惩罚项：

$$\lambda_p \sum_{pq\in\Omega_{\mathrm{GA}}}(u_{p,t}-v_{q,t}) \tag{37}$$

式中：Ω_{GA} 为气网管道集合；λ_p 为惩罚系数。

综上，可用式(32)、(34)、(36)代替式(25)。

网间耦合侧，见约束(41)—(44)。

2.4 台风灾害下的电-气系统故障仿真流程

为掌握台风灾害下的 IEGS 故障，制定如图 2 所示的仿真流程，具体步骤如下：

步骤 1：根据气象台预报，获取台风的发展路径、登陆地点等相关信息。

步骤 2：据 2.1 节计算电力系统元件故障概率并采用蒙特卡洛结合系统信息熵的方法，模拟电力线路故障状态，判断是否发生“初始开断”，若是则输出结果并执行步骤 3，反之则执行步骤 5。

步骤 3：更新系统拓扑，依据 2.2 节计算输-配电网潮流分布，判断是否有严重过载线路，若是则执行保护切除，并继续考虑后续的潮流转移，重新执行步骤 3；反之则执行步骤 4。

步骤 4：依据 2.3 节对 IEGS 实施减载措施，输出系统切负荷分布、电-气耦合设备和 IEGS 的运行状态等结果，而后执行步骤 5。

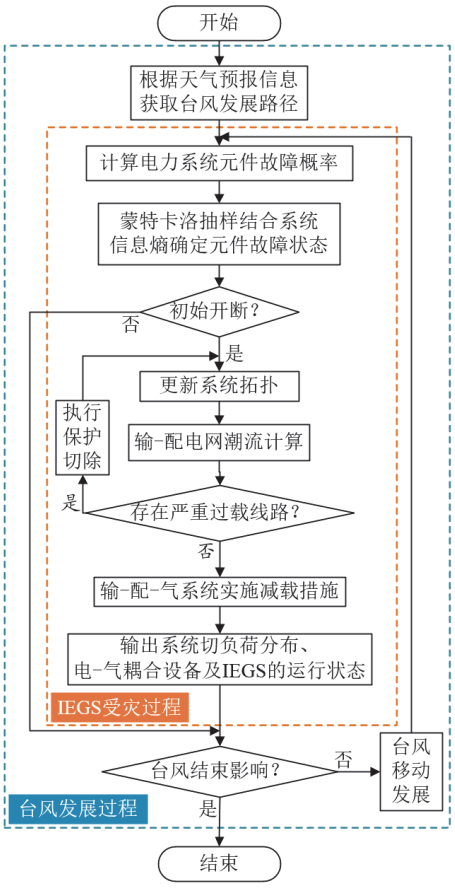


图 2 台风灾害下的 IEGS 故障仿真流程

Fig.2 Simulation process of IEGS faults under typhoon

步骤 5：依据台风的风圈范围判断台风对系统是否还存在影响。若是则根据台风的移动发展，返回步骤 2；反之则结束仿真。

3 基于自适应 C-ADMM 算法的 IEGS 分布式恢复策略

为恢复前述台风灾害造成的系统故障，本章提出一种 IEGS 故障恢复模型，除 2.3 节中的系统基本模型外，考虑了 IEGS 中电-气不同能量流的互济作用，利用了 IEGS 中的多种恢复资源，包括维修队、网架重构及气网管道储气。

此外，极端灾害下不同子系统间存在行业、资源及信息壁垒，相较于集中式方法，分布式方法更适用于极端灾害下的 IEGS 调度，具体体现在以下方面：1）分布式方法仅需交互少量边界信息，即可满足子系统间无法共享私有信息的隐私保护需求；2）分布式方法能够分散派遣电、气运营商的恢复资源，不同运营商无需共享行业及资源信息；3）分布

式方法对数据通讯的要求较低，而集中式方法存在传输信息量大、单点故障危害高的问题。ADMM 算法是典型的分布式算法，然而当 ADMM 算法中可分离算子的数量超过 2 时，将无法保证算法严格收敛。据此，本文提出基于自适应 C-ADMM 算法的求解方法，分布式求解 IEGS 故障恢复模型，在保证算法收敛性的同时并行优化 3 个子系统，实现各子系统分散实施恢复策略。为使系统能够根据灾前不断更新的台风信息，及时求解并调整策略，本文通过自适应更新惩罚因子及并行计算的方法，提升算法的收敛速度：自适应更新惩罚因子使算法在不同求解时期都能保持近乎最优的收敛性能，从而加快收敛速度并获得高质量解；而并行计算无需按次序求解优化子问题，能够充分利用多线程的计算资源，避免了传统串行算法中所需的等待求解时间。

3.1 IEGS 中的多种恢复资源

根据不同子系统特性，充分利用 IEGS 中的多种恢复资源，恢复台风灾害下的系统负荷损失。

3.1.1 输-配电网维修队

输-配电网架空线路处于地表，相较管道深埋地底、抢修工程量巨大的天然气网，能在故障发生后迅速派遣维修队进行抢修，派遣约束如下式：

$$\begin{cases} Z_{ij,1}=0,\forall(i,j)\in F \\ Z_{ij,t_n}\le Z_{ij,t_m},\ t_n\le t_m \\ \sum_{F} Z_{ij,t+T_{\mathrm{f}}}-\sum_{F} Z_{ij,t}\le h_0,\ \forall t\in[1,N_{\mathrm{T}}] \end{cases} \tag{38}$$

式中：$Z_{ij,t}$为表征线路运行状态的 0-1 变量，在输、配电网中分别为 $Z_{\mathrm{T},ij,t}$和 $Z_{\mathrm{D},mk,t}$；F 为故障线路集；T_{f}为检修一条故障线路所消耗的时间；h_0为最多能够同时检修的线路；N_{T}为总维修阶段。

3.1.2 配电网重构及辐射状约束

为尽可能保证对配电网负荷的供电连续性，应维持拓扑的辐射状结构。通过对辐射状约束的建模，网架重构能够动作联络开关从而尽可能为负荷提供电力支撑，下式为配电网重构及辐射状约束：

$$\begin{cases} \beta_{mk,t}+\beta_{km,t}=Z_{\mathrm{D},mk,t} \\ \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{m}}}\beta_{mk}=1 \\ \beta_{12}=1 \end{cases} \tag{39}$$

式中：$\beta_{mk,t}$为代表线路功率流向的 0-1 变量，表征节点 m 和 k 的上下游关系，若节点 m 为 k 的父节点，$\beta_{mk,t}$=1，反之则 $\beta_{km,t}$=1；N_{m}为节点数。

3.1.3 天然气网络动态恢复

除 2.3.2 节中介绍的双向导通管道模型外，天然气网络独有的慢动态特性在 IEGS 恢复研究中也至关重要。由于气体流速相对缓慢，管道存在一定量的储气。在系统故障时释放管道储气，能够有效恢复系统负荷损失。气网管存约束如下式：

$$\begin{cases} \bar{F}_{pq,t}=(F^{\mathrm{in}}_{pq,t}+F^{\mathrm{out}}_{pq,t})/2 \\ Q_{pq,t}=S_{pq}(\pi_{p,t}+\pi_{q,t})/2 \\ Q_{pq,t}=Q_{pq,t-1}+F^{\mathrm{in}}_{pq,t}-F^{\mathrm{out}}_{pq,t} \\ \sum_{pq\in\Omega_{\mathrm{GA}}} Q_{pq,\mathrm{T}}\ge\sum_{pq\in\Omega_{\mathrm{GA}}} Q_{pq,0} \end{cases} \tag{40}$$

式中：$F^{\mathrm{in}}_{pq,t}$和 $F^{\mathrm{out}}_{pq,t}$为管道 pq 的首末端流量；$Q_{pq,t}$和为管道 pq 在 t 时刻的管存；S_{pq}为管存常数。

3.2 不同能量流的互济作用

仅依靠单一子系统无法充分挖掘系统的韧性资源，因此，本文通过协调不同子系统间的耦合设备，充分协同电-气能量流的互济作用。子系统间的耦合约束包括 GT 的耗量特性方程(41)、P2G 的能量转换方程(42)、PC 的功率方程(43)以及输-配电网间的功率传输节点方程(44)。

$$F_{\mathrm{GT},p,t}=P_{\mathrm{GT},i,t}/(\eta_{\mathrm{gt}}H_{\mathrm{HV}}) \tag{41}$$

$$\begin{cases} F_{\mathrm{P2G},p,t}=P_{\mathrm{P2G},i,t}\eta_{\mathrm{p2g}}/H_{\mathrm{HV}} \\ 0\le P_{\mathrm{P2G},i,t}\le P^{\max}_{\mathrm{P2G},i} \end{cases} \tag{42}$$

$$P_{\mathrm{C},i,t}=K_{\mathrm{c},1}F_{\mathrm{C},h,t}\left(k_{\mathrm{cp}}^{K_{\mathrm{c},2}}-1\right) \tag{43}$$

$$\begin{cases} \lambda^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{T},i,t}\cdot P^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{T},i,t}=P^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{D},i,t} \\ \lambda^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{QT},i,t}\cdot Q^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{T},i,t}=Q^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{D},i,t} \end{cases} \tag{44}$$

式中：η_{gt}和η_{p2g}分别为 GT 和 P2G 的转换效率；H_{HV}为天然气高热值；$P^{\max}_{\mathrm{P2G},i}$为P2G设备$i$的耗电量上限；$K_{\mathrm{c},1}$和$K_{\mathrm{c},2}$为压缩机参数；$k_{cp}$为压缩比；$\lambda^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{T},i,t}$和$\lambda^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{QT},i,t}$为输-配交互处的输电网负荷削减剩余率；$P^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{T},i,t}$和$Q^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{T},i,t}$为输-配交互功率处的输电网负荷；$P^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{D},i,t}$和$Q^{\mathrm{dcc}}_{\mathrm{D},i,t}$分别为配电网的总注入有功和无功功率。

3.3 韧性评估指标

在极端事件发生时间内，系统损失性能的累积量可用于表征系统的韧性水平[34]：

$$R_s=\frac{\int_{t_0}^{T}F_s(t)\mathrm{d}t}{\int_{t_0}^{T}F_{s,0}(t)\mathrm{d}t} \tag{45}$$

式中：R_s为系统 s 的韧性水平，大小为 0 到 1，系统韧性水平越高，R_s越接近 1；$F_s(t)$和 $F_{s,0}(t)$分别为 t 时刻系统 s 在受灾和正常情况下的负荷功率。

3.4 IEGS 的解耦方法

为实现分布式控制 IEGS，本文根据耦合边界条件和边界母线撕裂法将系统解耦。为保证网络解耦前后等效，在子系统边界解耦处引入耦合变量，需满足一致性约束式(46)—(49)：

$$F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{GT},i,t}=F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{GT},p,t}=F_{\mathrm{GT},ip,t} \tag{46}$$

$$F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{P2G},i,t}=F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{P2G},p,t}=F_{\mathrm{P2G},ip,t} \tag{47}$$

$$P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{C},i,t}=P^{\mathrm{G}}_{\mathrm{C},h,t}=P_{\mathrm{C},ih,t} \tag{48}$$

$$\begin{cases} P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc},t}=P^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}=P_{\mathrm{dcc},t} \\ Q^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc},t}=Q^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}=Q_{\mathrm{dcc},t} \end{cases} \tag{49}$$

式中：$F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{GT},i,t}$ 和 $F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{GT},p,t}$ 为输电网和气网关于 GT 的耦合变量；$F_{\mathrm{GT},ip,t}$ 为 $F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{GT},i,t}$、$F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{GT},p,t}$ 的协调变量；$F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{P2G},i,t}$ 和 $F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{P2G},p,t}$ 为输电网和气网 P2G 的耦合变量；$F_{\mathrm{P2G},ip,t}$ 为 $F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{P2G},i,t}$、$F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{P2G},p,t}$ 的协调变量；$P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{C},i,t}$ 和 $P^{\mathrm{G}}_{\mathrm{C},h,t}$ 为输电网和气网关于 PC 的耦合变量；$P_{\mathrm{C},ih,t}$ 为 $P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{C},i,t}$、$P^{\mathrm{G}}_{\mathrm{C},h,t}$ 的协调变量；$P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc},t}$ 和 $Q^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc},t}$ 为输电网的输-配交互功率；$P^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}$ 和 $Q^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}$ 为配电网的注入功率；$P_{\mathrm{dcc},t}$ 为 $P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc},t}$、$P^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}$ 的协调变量；$Q_{\mathrm{dcc},t}$ 为 $Q^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc},t}$、$Q^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}$ 的协调变量。

3.5 基于自适应 C-ADMM 的分布式调度控制框架

将 IEGS 解耦后，分别构建各子系统的恢复模型，以此进行分布式调度控制。

3.5.1 输电网恢复模型

$$\begin{cases} \min\Big(\sum\limits_{i\in\Omega_{\mathrm{TE}}} C^{\mathrm{T}}\cdot(1-\lambda_{\mathrm{T},i,t})\cdot P_{\mathrm{T},i,t}\Big)+ \\ \lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{gt},i,t}(F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{GT},i,t}-F_{\mathrm{GT},ip,t})+0.5\rho_{\mathrm{gt}}(F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{GT},i,t}-F_{\mathrm{GT},ip,t})^2+ \\ \lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{p2g},i,t}(F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{P2G},i,t}-F_{\mathrm{P2G},ip,t})+ \\ 0.5\rho_{\mathrm{p2g}}(F^{\mathrm{T}}_{\mathrm{P2G},i,t}-F_{\mathrm{P2G},ip,t})^2+ \\ \lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{c},i,t}(P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{C},i,t}-P_{\mathrm{C},ih,t})+0.5\rho_{\mathrm{c}}(P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{C},i,t}-P_{\mathrm{C},ih,t})^2+ \\ \lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dccp},t}(P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc,t}}-P_{\mathrm{dcc,t}})+0.5\rho_{\mathrm{dcc}}(P^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc,t}}-P_{\mathrm{dcc,t}})^2+ \\ \lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dccq},t}(Q^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc,t}}-Q_{\mathrm{dcc,t}})+0.5\rho_{\mathrm{dcc}}(Q^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dcc,t}}-Q_{\mathrm{dcc,t}})^2 \\ \text{s.t.式(11)—(16),(38),(41),(42),(44)} \end{cases} \tag{50}$$

式中：$\lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{gt},i,t}$、$\lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{p2g},i,t}$ 和 $\lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{c},i,t}$ 为输电网关于 GT、P2G 和 PC 的对偶乘子；$\lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dccp},t}$ 和 $\lambda^{\mathrm{T}}_{\mathrm{dccq},t}$ 为输电网输-配交互功率的对偶乘子；ρ_{gt}、ρ_{p2g} 和 ρ_{c} 分别为 GT、P2G 和 PC 的惩罚因子；ρ_{dcc} 为输-配交互功率惩罚因子。

3.5.2 配电网恢复模型

$$\begin{cases} \min\Big(\sum\limits_{i\in\Omega_{\mathrm{TE}}} C^{\mathrm{D}}\cdot(1-\lambda_{\mathrm{D},m,t})\cdot P_{\mathrm{D},m,t}\Big)+ \\ \lambda^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dccp},t}(P^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}-P_{\mathrm{dcc},t})+0.5\rho_{\mathrm{dcc}}(P^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}-P_{\mathrm{dcc},t})^2+ \\ \lambda^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dccq},t}(Q^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}-Q_{\mathrm{dcc},t})+0.5\rho_{\mathrm{dcc}}(Q^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dcc},t}-Q_{\mathrm{dcc},t})^2 \\ \text{s.t.式(17)—(19),(21)—(24),(38),(39)} \end{cases} \tag{51}$$

式中：$\lambda^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dccp},t}$ 和 $\lambda^{\mathrm{D}}_{\mathrm{dccq},t}$ 分别为配电网在输-配边界交互有功和无功功率的对偶乘子。

3.5.3 天然气网络恢复模型

$$\begin{cases} \min\Big(\sum\limits_{i\in\Omega_{\mathrm{TE}}} C^{\mathrm{L}}\cdot(1-\lambda_{\mathrm{L},p,t})\cdot F_{\mathrm{L},p,t}\Big)+ \\ \lambda^{\mathrm{G}}_{\mathrm{gt},i,t}(F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{GT},i,t}-F_{\mathrm{GT},ip,t})+0.5\rho_{\mathrm{gt}}(F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{GT},i,t}-F_{\mathrm{GT},ip,t})^2+ \\ \lambda^{\mathrm{G}}_{\mathrm{p2g},i,t}(F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{P2G},i,t}-F_{\mathrm{P2G},ip,t})+0.5\rho_{\mathrm{p2g}}(F^{\mathrm{G}}_{\mathrm{P2G},i,t}-F_{\mathrm{P2G},ip,t})^2+ \\ \lambda^{\mathrm{G}}_{\mathrm{c},i,t}(P^{\mathrm{G}}_{\mathrm{C},i,t}-P_{\mathrm{C},ih,t})+0.5\rho_{\mathrm{c}}(P^{\mathrm{G}}_{\mathrm{C},i,t}-P_{\mathrm{C},ih,t})^2 \\ \text{s.t.式(26)—(31),(32),(34),(36),(40),(43)} \end{cases} \tag{52}$$

式中：$\lambda^{\mathrm{G}}_{\mathrm{gt},i,t}$、$\lambda^{\mathrm{G}}_{\mathrm{p2g},i,t}$ 和 $\lambda^{\mathrm{G}}_{\mathrm{c},i,t}$ 分别为气网关于 GT、P2G 和 PC 设备的对偶乘子。

3.5.4 自适应 C-ADMM 算法的求解流程

所提模型基于自适应C-ADMM算法并行求解，并自适应更新算法中的惩罚因子以改善算法收敛性能。在迭代过程中，依据原始残差和对偶残差动态调整惩罚因子，从而改变迭代求解的步长，使惩罚因子不依赖于根据经验参数选取的初值。求解流程如图 3 所示，具体步骤见附录 B。

综上，所提方法仅需交互子系统间少量的边界信息，即可分散实施恢复策略。

4 仿真算例

4.1 算例介绍

本文以 IEGS 作为研究对象，该 IEGS 由改进的 IEEE30 节点输电网、IEEE33 节点配电网和 24 节点天然气网耦合组成，系统的拓扑结构及组成如图 4 所示，包括火电机组 2 台，燃气轮机 2 台，分布式

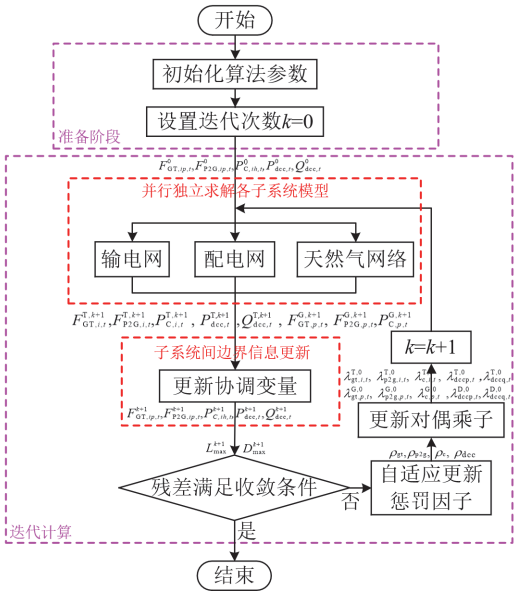


图 3 自适应 C-ADMM 算法的求解流程

Fig.3 The solution process of adaptive C-ADMM

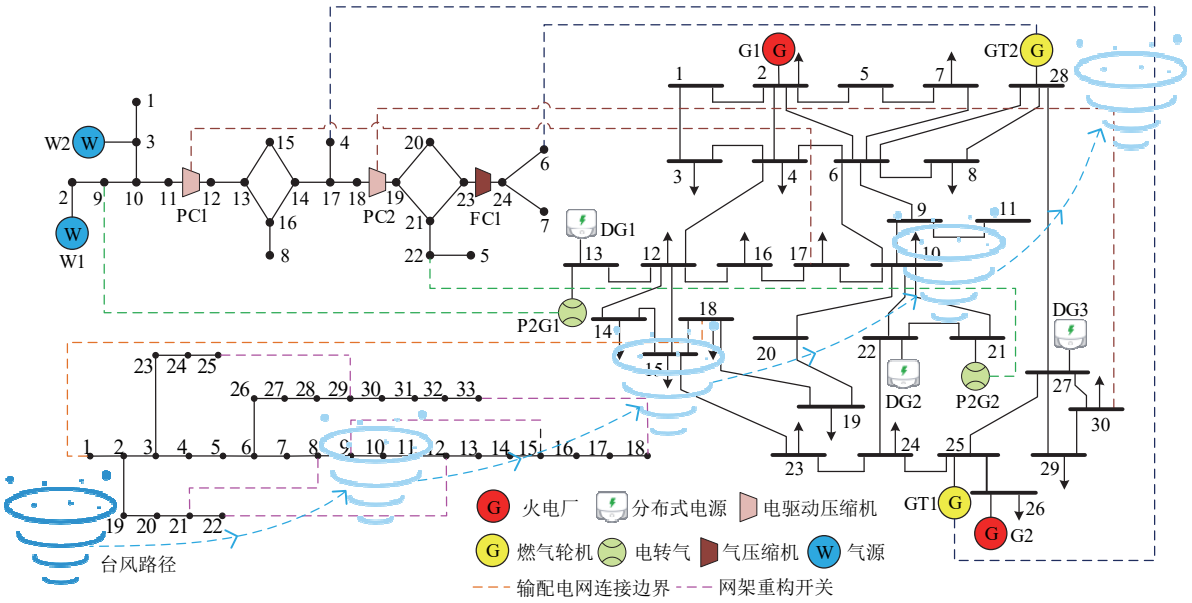


图 4 IEGS 结构

Fig.4 IEGS structure

电源 3 台，P2G 设备 2 台，电驱动压缩机 2 台，气压缩机 1 台，2 个常规气源和 5 个配电网网架联络开关。配电网节点 1 与输电网节点 18 相连并交互功率。台风移速、气压差等相关参数见附录 C 表 C1，电力系统地理拓扑及台风路径见附录 D 图 D1，其中，虚线为台风登陆前气象信息预报的台风移动路径，根据台风风圈及移动速度可计算得：每 3 h 台风掠过一个完整的风圈直径，则台风完全过境原受影响区域，视为可派遣维修队抢修。据此，设置 3 h 为一个恢复时段的长度，台风在 4 个恢复时段后完全过境。设输、配电网维修队在单时段内均可维修 1 条线路，且连续时段内均开断的线路为不可维修状态。自适应 C-ADMM 算法中，设置对偶乘子初值均为 1，收敛阈值 φ^{pri} 和 φ^{dual} 均为 10^{-5}。电力线路严重过载阈值的设定详见附录 E。

算例使用 Matlab R2021b 的 Yalmip 工具箱，并调用 Gurobi 10.0.1 求解。计算环境为 Win11，Intel Corei7-10700CPU，内存 16 GB。

4.2 台风灾害下的 IEGS 故障演化结果分析

台风灾害在不同时段多频次攻击系统，依据天气预报信息所提供的台风参数进行仿真，所得电力线路“初始开断”结果如表 1、2 所示。

表 1 为不同时段台风风圈的影响范围，表 2 为不同时段电力线路的“初始开断”情况。依据表 1、2 可知：时段 1 内，台风风圈的影响范围内无输电线路，未引发输电线路的初始开断，仅影响配电线路；后续 3 个时段内，台风已过境配电网，未对配电线路造成新的开断；而输电网后续 3 个时段均在台风风圈的影响范围内，随着台风路径迁移，输电线路在不同时段发生线路初始开断。

表 1 台风风圈影响范围

Table 1 Range of influence of typhoon wind circle

电网	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
配电网	在境	过境	过境	过境
输电网	未抵达	在境	在境	在境

表 2 电力系统“初始开断”情况

Table 2 First generation disconnection situation of power system

输配电	初始开断线路			
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
配电	13-14 17-18 19-20 21-22 27-28	无	无	无
输电	无	21-22 27-29 27-30 29-30	9-10 10-21 10-22 21-22	9-11 9-10 10-21 8-28

图 5 为时段 1 台风造成的配电网初始开断结果，据表 2 可知：该时段输电网线路未发生初始开断，台风仅在配电网造成线路初始开断。而后，仿真得到该时段 IEGS 后续未进一步发生故障。分析可得：由于配电网潮流呈辐射状分布，由始节点至末节点逐渐减少。该时段配电线路初始开断所产生

的潮流转移量较小，未有线路严重过载引发保护开断。此外，对于系统整体而言，时段 1 发生的配电线路初始开断仅影响输-配电网间的交互功率，未影响电驱动压缩机等电-气耦合设备。

时段 2 台风造成的 IEGS 故障结果如图 6 所示，由图 6(a)的输电网潮流计算结果可得：台风灾害致使输电线路 21-22 初始开断后，原线路潮流迅速转移至输电线路 10-21，造成该线路严重过载并引发保护开断。进一步，如图 6(b)所示，输电线路 10-21 和 21-22 的相继开断将导致电转气设备 P2G2 失去电力供应，进而退出运行，断开对气网的供能；此外，输电线路 27-29、27-30、29-30 的开断切除了对输电网节点 30 的电力供应，使得节点 30 所连电驱动压缩机瘫痪，导致气网中相应节点的气压抬升受限，引发管道内气流量拥堵，造成后续节点因无法得到足额天然气而产生负荷损失。

时段 3 台风造成的 IEGS 故障结果如图 7 所示，由图 7(a)的输电网潮流计算结果可知：台风攻击发

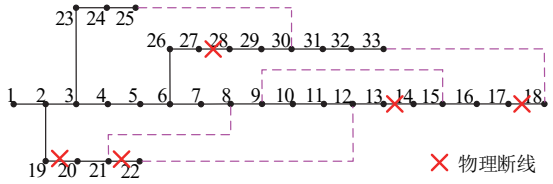
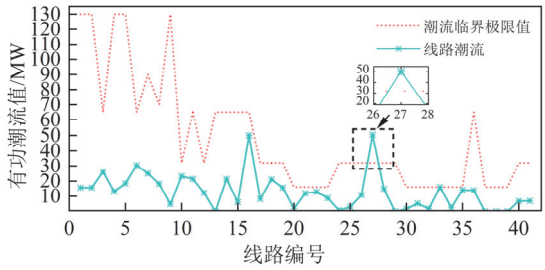
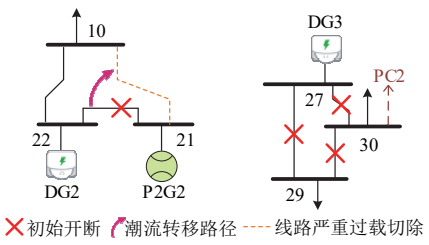


图 5　配电网初始开断结果

Fig.5　First generation disconnection result of distribution



(a) 时段 2 输电网潮流计算结果



(b) 时段 2 输电网受台风侵袭断线

图 6　时段 2 台风造成的 IEGS 故障结果

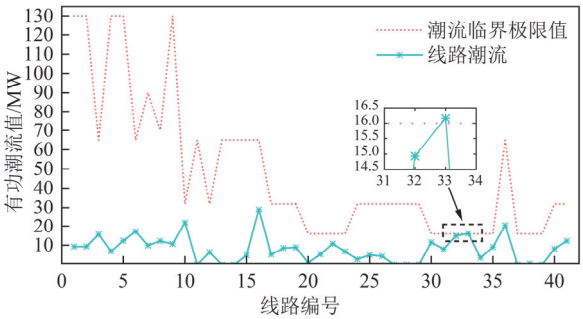
Fig.6　IEGS malfunction caused by typhoon in period 2

生初始开断后，潮流的转移引起输电线路 24-25 严重过载并保护开断。然而，如图 7(b)所示：潮流转移并未结束，输电线路 24-25 开断后进一步改变了系统潮流分布，导致输电线路 25-27 严重过载并保护开断。这种接连的潮流转移会导致多条线路发生过载开断，严重威胁系统的安全运行。同时，如图 7(c)所示：输电网的节点 21 断开了与所有线路的连接，完全失去电力供应，因而该节点上所连 P2G2 瘫痪，影响对天然气网络的供能。

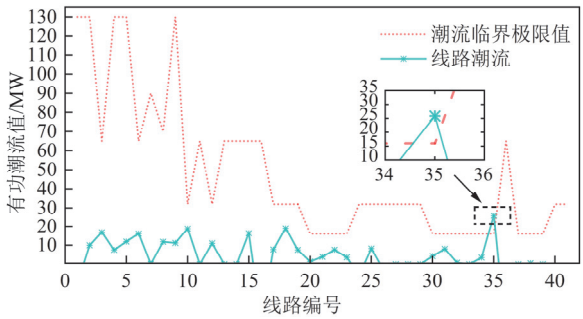
时段 4 的仿真结果如图 8 所示，未有线路发生严重过载，且电驱动耦合设备未发生故障。

4.3　IEGS 韧性提升策略分析

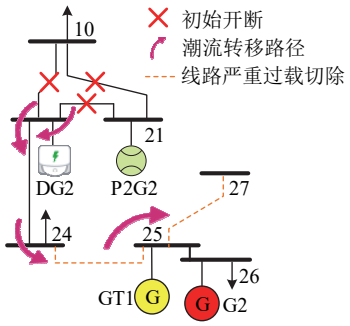
根据 4.2 节所得台风灾害下的 IEGS 故障结果，分布式求解所提 IEGS 恢复模型，制定恢复策略。



(a) 时段 3 输电网初始潮流计算结果



(b) 时段 3 输电网首次过载开断后的潮流计算结果



(c) 时段 3 输电网受台风侵袭断线

图 7　时段 3 台风造成的 IEGS 故障结果

Fig.7　IEGS malfunction caused by typhoon in period 3

基于本文所提恢复策略，IEGS 的恢复结果及韧性水平 R_s 如表 3、4 所示。在恢复过程中，配电网的负荷损失量随策略的实施逐步降低，韧性水平 R_s 逐步升高。输电网在时段 1 虽未受台风攻击，但为协助配电网恢复故障，增加了节点 18 向配电网传输的功率，导致节点 18 出现少量负荷损失，该时段输电网其余节点均未发生负荷损失，具体结果如附录 C 表 C2 所示。此后，输电网虽每一时段皆有新增故障开断，但负荷损失值呈现明显下降，输电网韧性水平 R_s 逐步恢复。气网在时段 1 中未受台风灾害影响，无负荷损失；然而在时段 2 中，电压缩机 PC2 因失电瘫痪阻碍了天然气的传输，造成了大量负荷损失；本文所提方法及时调度资源以恢复造成气网故障的瘫痪机组，在时段 3 中恢复了输气网的负荷损失，使其韧性水平 R_s 升至 1。仿真结果表明：本文所提恢复策略有效恢复了 IEGS 的负荷损失，能够及时应对台风灾害下的 IEGS 故障演化，提升了系统整体韧性。

此外，本文所提策略利用不同子系统的恢复资源，并协同电-气能量流的互济作用，具体分析如下：

在输电网侧，配置输电网维修队，其抢修结果如表 5 所示。输电网在时段 1、2 分别处于无故障和初始故障状态，维修队无法对线路进行抢修。时段 3 维修队选择抢修输电线路 27-30，进而恢复节点 30 上的 PC2，抬升气网相应节点的气压，促使天然气正常流动，防止故障进一步蔓延。时段 4 维修队选择抢修输电线路 21-22 从而恢复节点 21 的电力供应，使 P2G2 重新投入运行，有助于稳定系统运行。

在天然气网络侧，充分利用气网的慢动态特性，通过释放管道储气以协助 IEGS 恢复。与未考虑管道储气的稳态气网对比，恢复结果如图 9 所示。据 4.2 节所述，时段 1 气网未发生故障，时段 2 发生电-气耦联故障，因而时段 2 为气网初始受灾时段。显然，对于未考虑动态管存约束式(40)的稳态气网，初始受灾规模大大超过动态气网。这是由于压缩机故障导致气流量堵塞后，考虑动态特性的气网仍有部分负荷节点能依赖管道储气维持供能；对比后续时段中的恢复速度，考虑动态特性的气网显然快于仅考虑稳态的气网。因此，在恢复过程中需要考虑气网动态特性下的管道储气，挖掘气网韧性资源。此外，本文天然气网络的恢复模型采用可双向导通的天然气管道，图 10 为部分管道的天然气导通流向变化。有别于传统日前优化调度中的管道固定流向模型，韧性研究中的天然气管道应在不同时段依需选择导通方向，以协助系统进行负荷恢复。

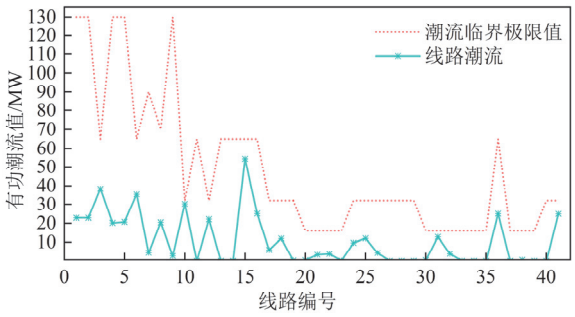


图 8 时段 4 输电网线路潮流分布

Fig.8 Current distribution of the line in period 4

表 3 IEGS 恢复结果

Table 3 Recovery results of IEGS

电网	负荷损失/MW			
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
配电网	0.336 2	0.255 4	0.149 2	0.047 7
输电网	0.437 0	21.746 8	20.680 2	6.213 3
输气网	0	50.942 4	0	0

表 4 IEGS 韧性水平 R_s

Table 4 Resilience recovery results of IEGS

电网	R_s			
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
配电网	0.878 8	0.927 3	0.959 6	0.983 8
输电网	0.997 7	0.881 4	0.882 4	0.962 8
输气网	1	0.753 9	1	1

表 5 输电网维修队抢修结果

Table 5 Repair results of transmission network

时段	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
抢修线路	无故障	初始故障	27-30	21-22

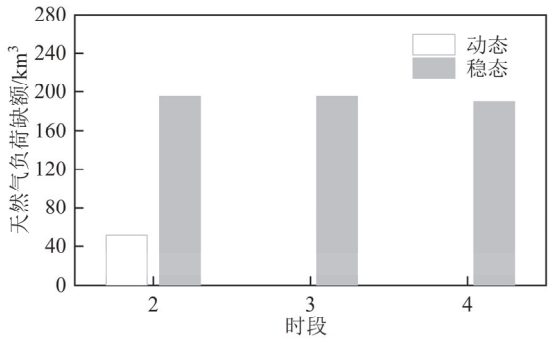


图 9 天然气网络动态与稳态恢复对比

Fig.9 Comparison of dynamic and steady state restoration in gas networks

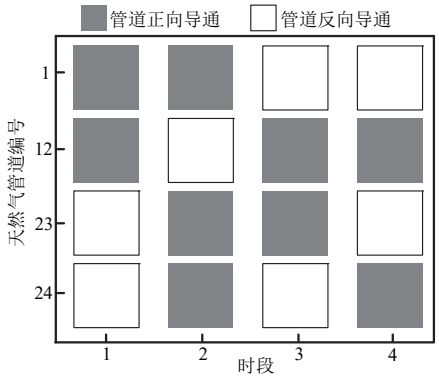


图 10 部分天然气管道导通流向

Fig.10 Partial natural gas pipeline flow direction

可双向导通的管道模型能够满足不同时段的系统恢复需求，提高天然气网络的恢复灵活性。

在配电网侧，动态协调网架重构及维修队，其不同恢复时段的拓扑变化情况如图 11 所示。

时段 1，配电网受台风侵袭导致 5 条线路初始开断。配电网网架重构开关即刻动作，改变系统拓扑。而后将维修队根据重构后的拓扑情况进行派遣，选取配电线路 19-20 进行抢修；时段 2 中，配电线路 19-20 完成抢修。为进一步恢复供电，依据抢修结果执行新的重构开关动作。而后，维修队又依据重构结果选择下一抢修目标；时段 3 中，配电线路 13-14 完成抢修，网架重构又重新进行动作；时段 4 中，配电线路 17-18 完成抢修，网架重构开关动作数降至 2。综上可知，本文所提方法灵活协同配电网维修队和网架重构，实现了对配电网拓扑的及时更新；并通过二者的动态配合，协助配电网恢复。

除各子系统内部的韧性资源外，不同能量流的互济作用在 IEGS 恢复中也至关重要，耦合设备耗能及出力情况如图 12 所示。为通过天然气能流协助输电网恢复，并减少堵塞流量造成的资源浪费，系统在时段 2 加大燃气轮机 GT1 的出力。此外，为协助气网恢复因电压缩机 PC2 故障造成的负荷损失，电转气设备 P2G1 在时段 3、4 均加大出力，增加电转气的能量转换额；P2G2 在时段 4 恢复后也及时出力，以协助稳固气网的安全运行。

4.4 分布式算法计算性能

为验证所提自适应 C-ADMM 算法的准确性和收敛性，与集中式算法、传统 ADMM 算法和自适应 ADMM 算法进行对比，不同算法求解所得的 IEGS 总负荷损失计算结果如表 6、7 所示。

将各算法与集中式算法对比可知，传统 ADMM

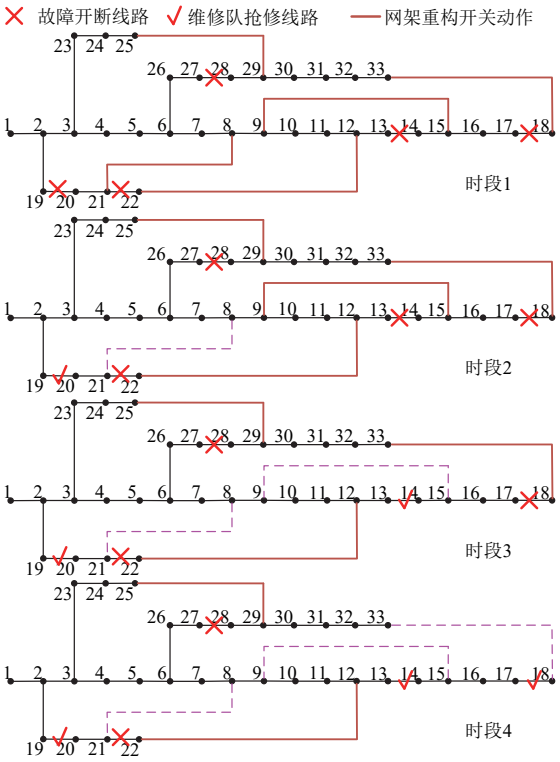
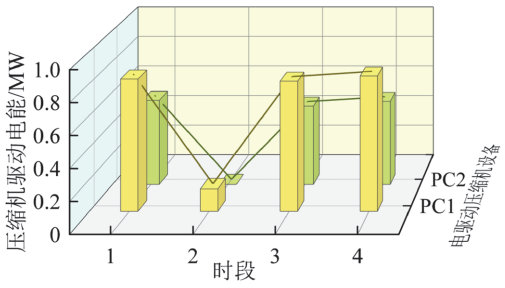
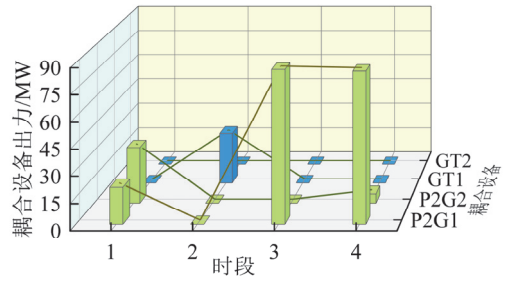


图 11 不同时段配电网拓扑动态变化情况

Fig.11 Dynamic changes in distribution network topology



(a) 电驱动压缩机耗能情况



(b) 耦合设备出力情况

图 12 耦合设备耗能及出力情况

Fig.12 Consumption and output of coupling equipment

在计算精度方面与其余算法存在差距。虽各算法对配电网负荷损失的计算结果都十分准确，然而在输电网和输气网的负荷损失计算结果中，自适应

ADMM 和自适应 C-ADMM 更具精度优势。自适应 ADMM 和自适应 C-ADMM 的优化结果与集中式相比，总体计算误差均小于 0.2%，且对各子系统的计算误差皆小于 0.5%。计算结果表明：这两种算法均具有准确性，能以不同子系统交互少量边界信息的形式进行调度控制。而传统 ADMM 则存在 3.59%的计算结果误差，准确性难以满足需求。与传统 ADMM 算法相比，自适应算法在每一次迭代过程中都依据原始残差和对偶残差更新惩罚因子，从而改变迭代求解的步长，这使得惩罚因子不依赖于初值的选取，能够减小惩罚因子对收敛结果的影响。

此外，将符合计算精度的自适应 ADMM 和自适应 C-ADMM 进行求解效率的对比，所得结果如表 7 所示。可知自适应 C-ADMM 的求解效率显著优于自适应 ADMM，除提升求解效率的算法价值外，更在韧性研究中具有实际工程意义：在台风来临前，天气预报不断更新并提供更准确的台风相关数据信息，因而求解效率的提升使得系统能够及时依据最新台风参数进行恢复策略求解，对实际情况更具适用性。自适应 ADMM 采用串行计算的求解方式，不同子系统需按一定次序进行求解，当某一子系统求解完成后才能求解下一子系统；而自适应 C-ADMM 算法无需考虑求解次序，能够充分调用服务器的计算资源，提高策略的求解效率。

图 13 所示为自适应 C-ADMM 算法的残差收敛过程。如图所示，自适应 C-ADMM 算法在迭代 267 次后完成收敛，原始残差和对偶残差在迭代求解过程中逐渐下降，并在第 267 次迭代中均小于收敛阈值 10^{-5}。表明所提算法能够有效收敛。

综上所述，本文所提自适应 C-ADMM 具有良好的计算准确性和收敛性。在分布式框架求解下，仅需交互少量边界信息，即可分散实施恢复策略，有效应对了极端台风灾害下，因各子系统间存在壁垒而导致无法集中施策的问题。

4.5 某子系统完全失联下的协同恢复结果分析

为验证某子系统完全失联下，协同剩余子系统的局部恢复效果，本文设置不同子系统的失联场景。假定某子系统在四个时段内均完全失联，台风造成电力系统“初始开断”的结果同 4.2 节，即时段 1 中配电线路发生开断、输电线路未开断；时段 2—4 输电线路发生开断、配电线路未新增开断。设置 3 种失联场景具体如下：

场景 1：配电网完全失联，输电网与天然气网协同恢复。

场景 2：天然气网完全失联，输电网与配电网协同恢复。

场景 3：输电网完全失联，由于配电网与天然气网未耦合，不同子系统相互独立。

场景 1 与场景 2 下剩余子系统的协同恢复结果如图 14 所示。由图可知：当配电网或天然气网完全失联时，通过对剩余子系统的协同，能够实现系统的局部恢复。

场景 1 中，由于配电网的注入功率完全来自与输电网的耦合节点，因而配电网完全失联时，输电网与天然气网耦合形成的系统不再向配电网供能。时段 1 输电线路未发生开断，而发生线路开断的配电网已完全失联，因此剩余子系统未有故障发生；时段 2 输电线路开断并发生故障演化，引起气网故障，剩余子系统开始协同恢复；在时段 2 至 4 中，系统的负荷损失逐渐降低，表明剩余子系统能够通过协同实现局部恢复；

场景 2 中，由于天然气网仅与输电网耦合，因而天然气网完全失联时，输电网与天然气网间的耦

表 6 不同算法的总负荷损失计算结果

Table 6 Calculation results for different algorithms

算法	输电网/MW	配电网/MW	输气网/km³
集中式	49.077 3	0.788 5	50.942 5
传统 ADMM	50.440 3	0.788 5	53.197 5
自适应 ADMM	49.076 9	0.788 5	50.960 1
自适应 C-ADMM	49.077 2	0.788 5	51.135 8

表 7 分布式算法求解效率对比

Table 7 Comparison of efficiency of distributed algorithms

算法	迭代次数	计算时间/s
自适应 ADMM	200	24 773
自适应 C-ADMM	267	11 489

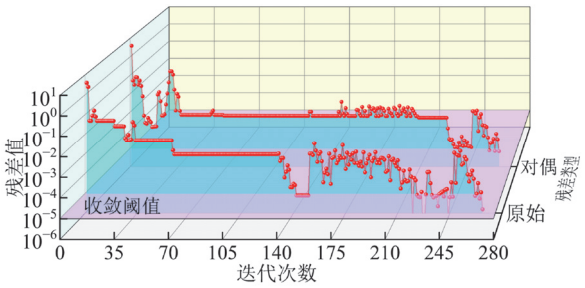
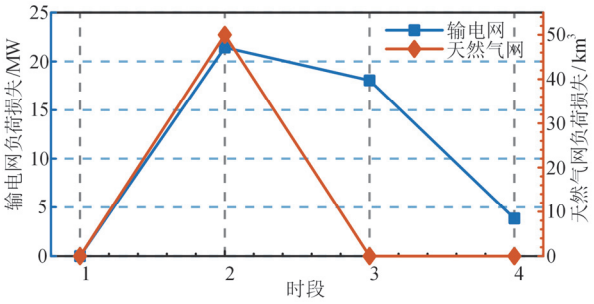
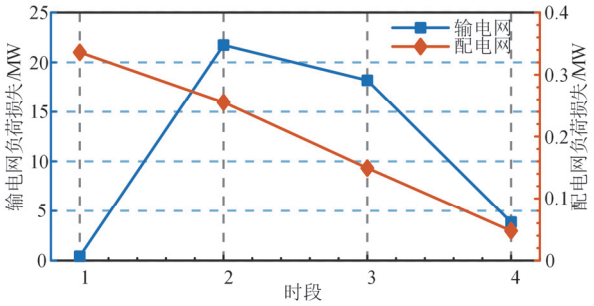


图 13 自适应 C-ADMM 残差收敛过程

Fig.13 Adaptive C-ADMM residual convergence process



(a) 场景 1 恢复结果



(b) 场景 2 恢复结果

图 14 场景 1 和场景 2 的协同恢复结果

Fig.14 Collaborative recovery results of scenario 1 and scenario 2

合设备完全退出运行。时段 1 配电线路发生开断并产生负荷损失，输电线路未开断；时段 2 输电线路开断，输电网发生故障；在 4 个时段中，系统负荷损失至故障开始阶段逐步减少，表明剩余的输电网与配电网耦合系统能够通过相连节点交互功率，协同实现局部恢复。

场景 2 中，由于配电网与天然气网未耦合，因而输电网完全失联时，不同子系统间的耦合连接完全切断，各子系统相互独立，子系统无法通过协同实现局部恢复。

综上，当配电网或天然气网完全失联时，能够通过协同剩余子系统实现局部恢复。然而，当不同子系统间失去耦合连接，各子系统完全相互独立时，无法通过协同手段实现局部恢复。

5 结论

为探究台风灾害下的 IEGS 故障演化过程，并在不同子系统间存在行业、资源及信息壁垒的现实情况下，充分利用 IEGS 中的多种恢复资源及电-气不同能量流的互济作用，恢复台风灾害造成的系统故障。本文提出一种台风灾害下计及故障演化的 IEGS 分布式恢复策略，主要结论如下：

1）所提台风灾害下的 IEGS 故障演化模型，在台风灾害造成系统“初始开断”后，识别了后续引起的电力线路过载和电-气耦联故障，有效模拟台风灾害下的 IEGS 故障演化过程，掌握了系统故障情况，从而提高后续恢复策略的适用性。

2）所提恢复策略充分利用了 IEGS 中的多种恢复资源及不同能量流的互济作用，有效恢复台风灾害造成的系统负荷损失，提高了 IEGS 的韧性水平。

3）所提基于 C-ADMM 的分布式恢复方法仅需交互子系统间的少量边界信息，即可实现各子系统分散实施恢复策略，且相较于传统分布式算法，有效提高了计算精度和求解效率。

需指出，随着新能源渗透率的提高，源荷不确定性将影响灾害下 IEGS 的安全运行。未来将进一步研究源荷不确定下的 IEGS 韧性恢复。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 孙为民，孙华东，何 剑，等. 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述[J]. 电网技术，2024，48(1)：129-139.
SUN Weimin, SUN Huadong, HE Jian, et al. Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 129-139.

[2] 李更丰，孙少华，别朝红，等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.

[3] 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)：7764-7774.
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): 7764-7774.

[4] 梁宇涛，林舜江，俞晓峰，等. 台风天气下含多海上风电场的输配电网分布式韧性恢复调度[J]. 电网技术，2025，49(2)：447-458.
LIANG Yutao, LIN Shunjiang, YU Xiaofeng, et al. Distributed resilient restoration dispatch for integrated transmission and distribution networks with multiple offshore wind farms under typhoon weather[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 447-458.

[5] 肖娟霞，李 勇，韩 宇，等. 计及台风时空特性和灵活性资源协同优化的配电网弹性提升策略[J]. 电工技术学报，2024，39(23)：7430-7446.
XIAO Juanxia, LI Yong, HAN Yu, et al. Resilience enhancement strategy for distribution networks considering the spatiotemporal characteristics of typhoon and the collaborative optimization of flexible resources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(23): 7430-7446.

[6] LIANG Y T, LIN S J, FENG X Y, et al. Optimal resilience enhance-

ment dispatch of a power system with multiple offshore wind farms considering uncertain typhoon parameters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153: 109337.

[7] 程 杉，冉 涛，喻 磊，等. 考虑配电网全过程韧性提升的多类型韧性资源分布鲁棒机会约束规划[J]. 电网技术，2025，49(1)：157-166.
CHENG Shan, RAN Tao, YU Lei, et al. Distributionally robust joint chance constraint planning for multi-type resilience resources considering full process resilience enhancement in distribution network[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 157-166.

[8] 陈怡冉，许 寅，张宸赓，等. 考虑台风强度尾部概率特性的电网负荷灾损评估方法[J/OL]. 电网技术，2024：1-12[2025-03-16]. https://doi. org/10.13335/j. 1000-3673. pst. 2024.1782.
CHEN Yiran, XU Yin, ZHANG Chengeng, et al. Power grid load loss assessment method considering the tail probability characteristics of typhoon intensity[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-12 [2025-03-16]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1782.

[9] 杨祺铭，李更丰，别朝红，等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(12)：130-139.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.

[10] 张 晓，毛艺静，许 彦，等. 台风灾害下考虑调节特性的多元资源紧急协调调度[J]. 电力系统自动化，2025，49(24)：63-74.
ZHANG Xiao, MAO Yijing, XU Yan, et al. Coordinated emergency dispatch of multiple resources considering regulation characteristics under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(24): 63-74.

[11] 林 佳，陈 浩，寇伟宏，等. 极端天气下保底电网骨干网架优化及弹性提升方法[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1591-1599.
LIN Jia, CHEN Hao, KOU Weihong, et al. Optimization and resilience enhancement method of core backbone network framework under extreme weather[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1591-1599.

[12] 牛 涛，黄骞谦，方斯顿，等. 基于多光谱卫星遥感的输电网冰灾场景时序建模与韧性提升策略优化[J]. 电工技术学报，2025，40(13)：4200-4215，4305.
NIU Tao, HUANG Qianqian, FANG Sidun, et al. Temporal modeling of ice disaster scenarios and optimization of resilience enhancement strategies in power transmission network based on multispectral satellite remote sensing data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13): 4200-4215, 4305.

[13] 顾雪平，魏佳俊，白岩松，等. 基于分层模型预测控制的含风电电力系统恢复在线决策方法[J]. 电工技术学报，2025，40(5)：1471-1486.
GU Xueping, WEI Jiajun, BAI Yansong, et al. Online decision-making method for wind power integrated power system restoration based on hierarchical model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1471-1486.

[14] 李明昊，杨祺铭，李更丰，等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术，2024，50(1)：93-104.
LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 93-104.

[15] 徐 岩，郭佳睿，马天祥. 考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5516-5528.
XU Yan, GUO Jiarui, MA Tianxiang. Coordinated optimization of fault recovery and emergency repair for distribution network considering resilience improvement[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5516-5528.

[16] 杨志淳，杨 帆，雷 杨，等. 基于多流融合的柔性互联配电网数据驱动鲁棒供电恢复方法[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3508-3520.
YANG Zhichun, YANG Fan, LEI Yang, et al. Data-driven robust service restoration method for flexible interconnected distribution networks based on multi-flow fusion[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3508-3520.

[17] 谢应彪，侯 慧，唐俊一，等. 台风灾害下含移动氢能存储的电-气综合能源系统负荷恢复策略[J]. 电力系统自动化，2025，49(6)：134-143.
XIE Yingbiao, HOU Hui, TANG Junyi, et al. Load restoration strategy for integrated electricity-gas energy system with mobile hydrogen energy storage under typhoon disasters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(6): 134-143.

[18] 何雨霏，王 伟，熊小伏，等. 提升电-气互联能源系统弹性的应急资源灾前协同调度策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(14)：21-32.
HE Yufei, WANG Wei, XIONG Xiaofu, et al. Pre-disaster collaborative dispatch strategy of emergency resources for resilience enhancement of electricity-gas interconnected energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 21-32.

[19] SUN Q R, WU Z, GU W, et al. Resilience assessment for integrated energy system considering gas-thermal inertia and system interdependency[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1509-1524.

[20] LI X, DU X X, JIANG T, et al. Coordinating multi-energy to improve urban integrated energy system resilience against extreme weather events[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118455.

[21] LV C X, LIANG R, JIN W, et al. Multi-stage resilience scheduling of electricity-gas integrated energy system with multi-level decentralized reserve[J]. Applied Energy, 2022, 317: 119165.

[22] 杨祺铭，李更丰，别朝红，等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2764-2774.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.

[23] LI G Q, YAN K F, ZHANG R F, 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.

[24] LIANG K J, WANG H T, LIN Z Z, et al. Distributed load restoration for interdependent transmission-distribution-gas systems considering pipeline gas storage capacity[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153: 109254.

[25] 林勇棋，邵振国，陈飞雄，等. 基于气网划分的电-气综合能源系统分布式低碳经济调度[J]. 电网技术，2023，47(7)：2639-2650.
LIN Yongqi, SHAO Zhenguo, CHEN Feixiong, et al. Distributed low-carbon economic scheduling of integrated electricity and gas system based on gas network division[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2639-2650.

[26] HE Y B, YAN M Y, 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.

[27] CHEN C H, HE B S, YE Y Y, et al. The direct extension of ADMM for multi-block convex minimization problems is not necessarily convergent[J]. Mathematical Programming, 2016, 155(1/2): 57-79.

[28] 焦在滨，马 逢，李宗博. 考虑天然气传输特性的气电耦合系统的联合运行与紧急过负荷控制研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(增刊 1)：77-83.
JIAO Zaibin, MA Feng, LI Zongbo. Study on combined operation of gas-electricity coupling system and emergency overload control considering the characteristics of natural gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(Supplement1): 77-83.

[29] FU X, LI H N, LI G. Fragility analysis and estimation of collapse status for transmission tower subjected to wind and rain loads[J]. Structural Safety, 2016, 58: 1-10.

[30] 周晓敏，葛少云，李 腾，等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(2)：505-513.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.

[31] 康海鹏，李长城，刘经纬，等. 计及碳捕集-电转气耦合特性的电-气互联系统连锁故障评估[J]. 电网技术，2022，46(9)：3394-3405.
KANG Haipeng, LI Changcheng, LIU Jingwei, et al. Assessment of cascading failures in integrated electricity and gas system considering coupling characteristics of carbon capture-power to gas[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3394-3405.

[32] 丁 明，钱宇骋，张晶晶. 考虑多时间尺度的连锁故障演化和风险评估模型[J]. 中国电机工程学报，2017，37(20)：5902-5912.
DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing. Multi-timescale cascading failure evolution and risk assessment model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5902-5912.

[33] 周智行，石立宝. 考虑风电不确定性及系统调频作用的电网连锁故障风险评估[J]. 中国电机工程学报，2021，41(10)：3305-3316.
ZHOU Zhihang, SHI Libao. Risk assessment of power system cascading failure considering wind power uncertainty and system frequency modulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3305-3316.

[34] 别朝红，林超凡，李更丰，等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9)：2735-2744.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744.



陈筱枫
2000—，男，硕士生
主要从事 综合能源系统韧性提升研究
E-mail：583201738@qq.com

CHEN Xiaofeng



陈飞雄(通信作者)
1990—，男，博士，副教授，博导
主要从事综合能源系统协同控制方面研究
E-mail：feixiongchen@fzu.edu.cn

CHEN Feixiong
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-07-14 在线出版日期 2025-09-19 编辑 陈 蔓

附录 A

1. 考虑风、雨荷载影响的台风灾害模型

首先，基于系统地理位置建立坐标系，通过天气预报信息得到台风相关移动路径，以台风中心眼位置为中心刻画移动路径，其表达式如下：

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + v_t \cos(\varphi)\Delta t \\ y_t = y_{t-1} + v_t \sin(\varphi)\Delta t \end{cases} \tag{A1}$$

式中：x_t 和 y_t 表示 t 时刻台风中心坐标；φ 表示台风移动的方向角；v_t 为移动速度；Δt 为时间间隔。

其次，利用 Batts 模型建模台风的对称风场，模拟台风过境过程的相关变化，具体如下：

$$R_{\max} = \mathrm{e}^{-0.1239\Delta P_t^{0.6003}+5.1043} \tag{A2}$$

$$v_{\mathrm{gx}} = \theta\sqrt{\Delta P} - 0.5R_{\max} f \tag{A3}$$

$$v_{\mathrm{R_{max}}} = 0.865 v_{\mathrm{gx}} + 0.5 v_t \tag{A4}$$

$$\begin{cases} V_{\mathrm{rin}} = V_{R_{\max}} r / R_{\max}, & r \le R_{\max} \\ V_{\mathrm{rout}} = V_{R_{\max}} (R_{\max})^x / r, & r > R_{\max} \end{cases} \tag{A5}$$

$$\Delta P_t = \Delta P_0 - 0.675(1+\sin\gamma)t \tag{A6}$$

式中：$R_{\max}$ 为台风的风圈最大半径；ΔP_t 为 t 时刻台风外围与中心气压差(hPa)，外围气压取 1 000 hPa；f 为地球自转科氏力系数；θ 为经验系数，本文取 6.72；v_{Rmax} 为台风的最大风速；v_{gx} 为台风垂直移速；V_{rin} 和 V_{rout} 分别为线路与台风风眼距离不大于和大于 $R_{\max}$ 时的瞬时风速；r 为线路距台风风眼的距离；x 为台风强度衰减参数；γ 为台风登陆时与海岸线的夹角。

2. 输-配电网的潮流计算模型

在电力侧，根据电力系统功率平衡方程，能够构造输电网和配电网的潮流计算模型：

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{e}}} Y_{ik}U_k = \dfrac{S_i^*}{U_i^*}, \ \forall i \in I_{\mathrm{PQ}} \\ \begin{cases} \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{e}}} Y_{ik}U_k = \dfrac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{U_i^*} \\ U_i U_i^* = |U_i^{\mathrm{sp}}|^2 \end{cases}, \ \forall i \in I_{\mathrm{PV}} \\ U_i = U_i^{\mathrm{sp}}, \ \forall i \in I_{\mathrm{PH}} \end{cases} \tag{A7}$$

式中：上标“*”表示共轭；I_{PQ}、I_{PV} 和 I_{PH} 分别为 PQ、PV 和平衡节点的集合；N_{e} 为系统节点数；S_i 为节点 i 的注入功率，P_i 和 Q_i 为注入有功和无功功率；U_i 为节点 i 的电压；Y_{ik} 为节点导纳矩阵的第(i, k)个元素；U_i^{sp} 为平衡节点给定的电压值；$|U_i^{\mathrm{sp}}|$为 PV 节点给定的电压幅值。

附录 B

1. 自适应 C-ADMM 算法的求解流程

步骤 1：设迭代次数 k=0；将对偶乘子初始化（$\lambda_{\mathrm{gt},i,t}^{\mathrm{T},0}$，$\lambda_{\mathrm{p2g},i,t}^{\mathrm{T},0}$，$\lambda_{\mathrm{c},i,t}^{\mathrm{T},0}$，$\lambda_{\mathrm{deep},t}^{\mathrm{T},0}$，$\lambda_{\mathrm{deeq},t}^{\mathrm{T},0}$，$\lambda_{\mathrm{gt},p,t}^{\mathrm{G},0}$，$\lambda_{\mathrm{p2g},p,t}^{\mathrm{G},0}$，$\lambda_{\mathrm{c},p,t}^{\mathrm{G},0}$，$\lambda_{\mathrm{deep},t}^{\mathrm{D},0}$，$\lambda_{\mathrm{deeq},t}^{\mathrm{D},0}$）、协调变量（$F_{\mathrm{GT},ip,t}^0$，$F_{\mathrm{P2G},ip,t}^0$，$P_{\mathrm{C},ih,t}^0$，$P_{\mathrm{dcc},t}^0$，$Q_{\mathrm{dcc},t}^0$）和惩罚因子（$\rho_{\mathrm{gt}}$,$\rho_{\mathrm{p2g}}$,$\rho_{\mathrm{c}}$, ρ_{dcc}）；设定原始残差和对偶残差的阈值 φ^{pri} 和 φ^{dual}。

步骤 2：输电网、配电网和天然气网络各自独立并行求解自身的子优化问题，获得耦合变量的值（$F_{\mathrm{GT},i,t}^{\mathrm{T},k+1}$，$F_{\mathrm{P2G},i,t}^{\mathrm{T},k+1}$，$P_{\mathrm{C},i,t}^{\mathrm{T},k+1}$，$P_{\mathrm{dcc},t}^{\mathrm{T},k+1}$，$Q_{\mathrm{dcc},t}^{\mathrm{T},k+1}$，$F_{\mathrm{GT},p,t}^{\mathrm{G},k+1}$，$F_{\mathrm{P2G},p,t}^{\mathrm{G},k+1}$，$P_{\mathrm{C},p,t}^{\mathrm{G},k+1}$）。

步骤 3：根据最新耦合变量的值更新协调变量（$F_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1}$，$F_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1}$，$P_{\mathrm{C},ih,t}^{k+1}$，$P_{\mathrm{dcc},t}^{k+1}$，$Q_{\mathrm{dcc},t}^{k+1}$），如下式：

$$\begin{cases} F_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1} = (F_{\mathrm{GT},i,t}^{\mathrm{T},k+1} + F_{\mathrm{GT},p,t}^{\mathrm{G},k+1})/2 \\ F_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1} = (F_{\mathrm{P2G},i,t}^{\mathrm{T},k+1} + F_{\mathrm{P2G},p,t}^{\mathrm{G},k+1})/2 \\ F_{\mathrm{C},ip,t}^{k+1} = (F_{\mathrm{C},i,t}^{\mathrm{T},k+1} + F_{\mathrm{C},p,t}^{\mathrm{G},k+1})/2 \\ P_{\mathrm{dcc},t}^{k+1} = (P_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{T},k+1} + P_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{D},k+1})/2 \\ Q_{\mathrm{dcc},t}^{k+1} = (Q_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{T},k+1} + Q_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{D},k+1})/2 \end{cases} \tag{B1}$$

步骤 4：判断原始残差 $L_{\max}^{k+1}$ 和对偶残差 $D_{\max}^{k+1}$ 是否满足算法收敛条件式(B4)，若满足，则迭代停止，输出结果；否则，继续执行步骤 5。其中原始残差和对偶残差的计算如式(B2)—(B3)所示。

$$\begin{cases} L_{\mathrm{GT},i,t}^{k+1} = \left\| F_{\mathrm{GT},i,t}^{\mathrm{T},k+1} - F_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1} \right\|^2 \\ L_{\mathrm{P2G},i,t}^{k+1} = \left\| F_{\mathrm{P2G},i,t}^{\mathrm{T},k+1} - F_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1} \right\|^2 \\ L_{\mathrm{C},i,t}^{k+1} = \left\| P_{\mathrm{C},i,t}^{\mathrm{T},k+1} - P_{\mathrm{C},ip,t}^{k+1} \right\|^2 \\ L_{\mathrm{P_{dcc}},t}^{k+1} = \left\| P_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{T},k+1} - P_{\mathrm{dcc},t}^{k+1} \right\|^2 \\ L_{\mathrm{Q_{dcc}},t}^{k+1} = \left\| Q_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{T},k+1} - Q_{\mathrm{dcc},t}^{k+1} \right\|^2 \end{cases} \tag{B2}$$

$$\begin{cases} D_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1} = \left\| F_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1} - F_{\mathrm{GT},ip,t}^{k} \right\|^2 \\ D_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1} = \left\| F_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1} - F_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k} \right\|^2 \\ D_{\mathrm{C},ip,t}^{k+1} = \left\| P_{\mathrm{C},ip,t}^{k+1} - P_{\mathrm{C},ip,t}^{k} \right\|^2 \\ D_{\mathrm{P_{dcc}},t}^{k+1} = \left\| P_{\mathrm{dcc},t}^{k+1} - P_{\mathrm{dcc},t}^{k} \right\|^2 \\ D_{\mathrm{Q_{dcc}},t}^{k+1} = \left\| Q_{\mathrm{dcc},t}^{k+1} - Q_{\mathrm{dcc},t}^{k} \right\|^2 \end{cases} \tag{B3}$$

$$\begin{cases} L_{\max}^{k+1} = \max\left\{L_{\mathrm{GT},i,t}^{k+1}, L_{\mathrm{P2G},i,t}^{k+1}, L_{\mathrm{C},i,t}^{k+1}, L_{\mathrm{P_{dcc}},t}^{k+1}, L_{\mathrm{Q_{dcc}},t}^{k+1}\right\} \\ L_{\max}^{k+1} \le \varphi^{\mathrm{pri}} \\ D_{\max}^{k+1} = \max\left\{D_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1}, D_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1}, D_{\mathrm{C},ip,t}^{k+1}, D_{\mathrm{P_{dcc}},t}^{k+1}, D_{\mathrm{Q_{dcc}},t}^{k+1}\right\} \\ D_{\max}^{k+1} \le \varphi^{\mathrm{dual}} \end{cases} \tag{B4}$$

步骤 5：根据原始残差和对偶残差的值更新惩罚因子，以加快收敛速度。如下式：

$$\rho^{k+1} = \begin{cases} 2\rho^{k}, & \max(L_t^{k+1}) \ge 10\max(D_t^{k+1}) \\ 0.5\rho^{k}, & \max(D_t^{k+1}) \ge 10\max(L_t^{k+1}) \\ \rho^{k}, & \text{其他} \end{cases} \tag{B5}$$

步骤 6：根据最新的耦合变量和协调变量的值，采用式(B6)更新对偶乘子；设置迭代次数 k=k+1，继续执行步骤 2。

$$\begin{cases} \lambda_{\mathrm{gt},i,t}^{\mathrm{T},k+1} = \lambda_{\mathrm{gt},i,t}^{\mathrm{T},k} + \rho_{\mathrm{gt}}(F_{\mathrm{GT},i,t}^{\mathrm{T},k+1} - F_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1}) \\ \lambda_{\mathrm{gt},p,t}^{\mathrm{G},k+1} = \lambda_{\mathrm{gt},p,t}^{\mathrm{G},k} + \rho_{\mathrm{gt}}(F_{\mathrm{GT},p,t}^{\mathrm{G},k+1} - F_{\mathrm{GT},ip,t}^{k+1}) \\ \lambda_{\mathrm{p2g},i,t}^{\mathrm{T},k+1} = \lambda_{\mathrm{p2g},i,t}^{\mathrm{T},k} + \rho_{\mathrm{p2g}}(F_{\mathrm{P2G},i,t}^{\mathrm{T},k+1} - F_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1}) \\ \lambda_{\mathrm{p2g},p,t}^{\mathrm{G},x,k+1} = \lambda_{\mathrm{p2g},p,t}^{\mathrm{G},k} + \rho_{\mathrm{p2g}}(F_{\mathrm{P2G},p,t}^{\mathrm{G},k+1} - F_{\mathrm{P2G},ip,t}^{k+1}) \\ \lambda_{\mathrm{c},i,t}^{\mathrm{T},k+1} = \lambda_{\mathrm{c},i,t}^{\mathrm{T},k} + \rho_{\mathrm{c}}(P_{\mathrm{C},i,t}^{\mathrm{T},k+1} - P_{\mathrm{C},ip,t}^{k+1}) \\ \lambda_{\mathrm{c},p,t}^{\mathrm{G},k+1} = \lambda_{\mathrm{c},p,t}^{\mathrm{G},k} + \rho_{\mathrm{c}}(P_{\mathrm{C},p,t}^{\mathrm{G},k+1} - P_{\mathrm{C},ip,t}^{k+1}) \\ \lambda_{\mathrm{dccp},t}^{\mathrm{T},k+1} = \lambda_{\mathrm{dcc},t}^{\mathrm{T},k} + \rho_{\mathrm{dcc}}(P_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{T},k+1} - P_{\mathrm{dcc},t}^{k+1}) \\ \lambda_{\mathrm{dccp},t}^{\mathrm{D},k+1} = \lambda_{\mathrm{dcc},t}^{\mathrm{D},k} + \rho_{\mathrm{dcc}}(P_{\mathrm{dcc,t}}^{\mathrm{D},k+1} - P_{\mathrm{dcc},t}^{k+1}) \end{cases} \tag{B6}$$

附录 C

表 C1　台风参数设置

Table C1　Typhoon disaster simulation parameter settings

符号	参数名称	设置数值	符号	参数名称	设置数值
v_t	台风移动速度	36 km/h	a_{equ}	等效系数	0.009 376
ΔP_0	台风外围与中心初始气压差	70 hPa	b_{equ}	等效系数	0.708 7
γ	台风登陆时与海岸线的夹角	60°	c_{equ}	等效系数	0.006 462
x	台风强度衰减参数	0.5	d_{equ}	等效系数	1.248 6
α_{ij}	相关系数	10.549 7	e_{equ}	等效系数	−0.276 9
β_{ij}	相关系数	3.038 5	V_{des}	线路风速设计值	30 m/s
γ_{ij}	相关系数−	−31.008 7	H_{des}	线路降雨量设计值	50 mm/h

表 C2　时段 1 的输电网负荷剩余率

Table C2　Remaining load rate of transmission network in period 1

节点编号	负荷剩余率	节点编号	负荷剩余率	节点编号	负荷剩余率	节点编号	负荷剩余率	节点编号	负荷剩余率
1	无负荷	7	1	13	无负荷	19	1	25	无负荷
2	1	8	1	14	1	20	1	26	1
3	1	9	无负荷	15	1	21	1	27	无负荷
4	1	10	1	16	1	22	无负荷	28	无负荷
5	无负荷	11	无负荷	17	无负荷	23	1	29	1
6	无负荷	12	1	18	0.9013	24	1	30	无负荷

附录 D

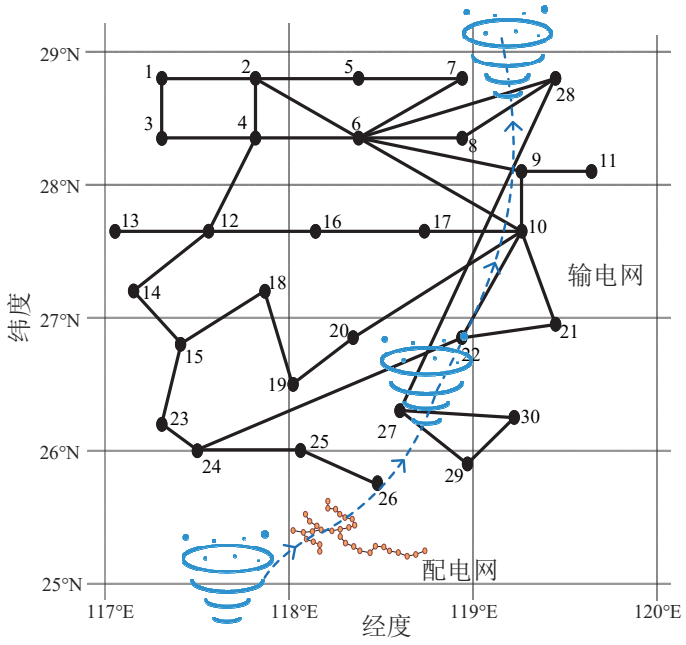


图 D1　电力系统地理拓扑与台风位置

Fig.D1　Geographic topology of power system and typhoon location

附录 E

表 E1　IEEE30 节点输电网严重过载阈值

Table E1　IEEE 30-bus power transmission network severe overload threshold

支路编号	过载阈值	支路编号	过载阈值	支路编号	过载阈值	支路编号	过载阈值	支路编号	过载阈值	支路编号	过载阈值	支路编号	过载阈值
1-2	130	4-6	90	9-11	65	16-17	16	10-21	32	24-25	16	29-30	16
1-3	130	5-7	70	9-10	65	15-18	16	10-22	32	25-26	16	8-28	32
2-4	65	6-7	130	4-12	65	18-19	16	21-22	32	25-27	16	6-28	32
3-4	130	6-8	32	12-13	65	19-20	32	15-23	16	28-27	65		
2-5	130	6-9	65	12-16	32	10-20	32	22-24	16	27-29	16		
2-6	65	6-10	32	14-15	16	10-17	32	23-24	16	27-30	16		

IEEE33 节点配电网标准测试系统[r1]中，并未直接提供 RATE_C 值，作者依据标准 IEEE Std 738-2006[r2]计算导线的长期运行允许功率：$S=\sqrt{3}V_{\text{base}}I_{\text{rate}}\approx 4.37$ MVA。其中，V_{base} 和 I_{rate} 分别为配电网电压等级和长期允许电流。而根据 DL/T 5729—2016《配电网规划设计技术导则》[r3]，配电网支路的紧急允许功率不低于长期允许功率。综上设计标准并参考文献[r4]，本文设置配电网的支路紧急允许功率为 6 MVA。

参考文献

[r1] IEEE. IEEE Xplore digital library[EB/OL]. [2025-08-17]. https://www.ieee.org/publications/subscriptions/products/mdl/ieeexplore-access.

[r2] IEEE. IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors: 738-2006[S], 2007.

[r3] 国家能源局. 配电网规划设计技术导则：DL/T 5729—2016[S]. 北京：中国电力出版社，2016.
National Energy Administration. The guide for planning and design of distribution network：DL/T 5729—2016[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2016.

[r4] EPPSTEIN M J, HINES P D H. A “random chemistry” algorithm for identifying collections of multiple contingencies that initiate cascading failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1698-1705.