第 50 卷 第 11 期：4826-4838 高电压技术 Vol.50, No.11: 4826-4838
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230708

基于有限状态机的新型配电网多流融合仿真引擎

刘科研，李　昭，贾东梨，叶学顺
（中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：新型配电网具有多源化、数字化、信息化、柔性化及互动化的特点，其所涉及的信息系统和物理系统紧密耦合、复杂多变，对常规配电系统的规划、运行仿真分析提出了挑战。为解决上述问题，针对配电网能量流、信息流、业务流和控制流的融合特性，提出一种基于有限状态机的新型配电网多流融合仿真引擎，构建了基于实时快速仿真的融合仿真架构，设计了物理层、上位机、实时仿真层之间的状态互动控制方案，以及各层内部的状态控制转换策略，并以新型配电网故障重构应用场景为例，接入融合仿真引擎，优选最佳故障重构路径，并与传统优化模型进行了对比。算例仿真结果表明：所设计的方案能够有效结合新型配电网控制系统，通过通信和控制实现新型配电系统的故障定位与优化重构，为新型配电网的数模混合仿真、业务场景复现与优化运行提供技术支撑。

关键词：新型配电网；配电信息物理系统；有限状态机；多流融合仿真；配电网故障重构

Multi-flow Fusion Simulation Engine for New Distribution Network Based on Finite State Machine

LIU Keyan, LI Zhao, JIA Dongli, YE Xueshun
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract：The new distribution network system has the characteristics of multi-source, digitalization, informatization, flexibility, and interactivity. The information and physical systems involved in it are closely coupled and complex, posing challenges to the planning and operation simulation analysis of conventional distribution systems. In order to solve the above problems, in view of the fusion characteristics of energy flow, information flow, service flow and control flow of distribution network, we propose a new distribution network multi-flow fusion simulation engine based on finite state machine, construct a fusion simulation architecture based on real-time rapid simulation, and design a state interaction control scheme between physical layer, host computer and real-time simulation layer, and a state control conversion strategy within each layer. Moreover, the new distribution network fault reconstruction application scenario is taken as an example, and a fusion simulation engine is connected to select the optimal fault reconstruction path, and compared with the traditional optimization model. The simulation results show that the designed scheme can effectively combine with the new distribution network control system, achieve fault localization and reconstruction of the new distribution system through communication and control, and provide technical supports for the digital analog mixed simulation, business scenario replication, and optimized operation of the new distribution network.

Key words：new distribution network; distribution information physics system; finite state machine; multi flow fusion simulation; distribution network fault reconstruction

0　引言

随着“双碳”政策的推进与新型电力系统建设的深化[1]，以及计算机技术和信息技术的快速发展，对配电系统的运行提出了更高的要求[2]。新型源荷功率的波动性和随机性对配电网的安全运行和灵活性提出了新的要求和挑战[3]，大规模分布式可再生能源和柔性电力装置的接入使得当前电力系统呈现出愈加庞大且复杂的趋势[4-5]。为了对分布式电源设备进行分层主动控制，将新型配电网和信息物理系统进行融合显得尤为重要。应用 3C(computation、communication、control)技术的信息物理系统(cyber-physical systems，CPS)将计算系统、通信系统和电力系统融为一体，形成了多维异构复杂系统[6]，可

基金资助项目：国家电有限网公司总部科技项目(面向多流融合的有源配电网仿真与测试验证关键装备研发及应用) (5400-202122147A-0-0-00)。
Project supported by State Grid Headquarters Science and Technology Project (Research and Application of Key Equipment for Simulation and Test Verification of Active Distribution Network for Multi-stream Integration) (5400-202122147A-0-0-00).

以实现深度的通信、计算和控制。因此，开展新型配电网多流融合的仿真引擎具有重要的现实意义。

在新型配电网多流融合方面，近年来已有部分学者进行了相关研究。文献[7]基于图论、矩阵分析、网络演算理论和电力系统潮流计算方法，提出了信息流的建模思路和静态计算方法；文献[8]提出了包含管理层、仿真层与交互层的配电网 CPS 实时仿真架构，为主控与实时仿真的交互提供了方案；文献[9]提出了一种新型配电系统故障恢复方案解析优选方法，可通过降低时间复杂度来解决场景维数灾，但是没有提到采用查询故障恢复库的形式来降低计算时间；文献[10]提出一种基于交替方向乘子法的多目标最优电-气能量流的分布式计算方法。上述文献对信息流和能量流分别进行独立研究，没有考虑到能量流和信息流的耦合特性。

随着配电网信息物理系统的快速发展，信息系统和物理系统间的耦合程度越来越高，其复杂度也越来越高，配电物理系统的可靠性越来越依赖于信息系统，因此配电网信息物理系统的可靠性分析和评估工作很重要。有许多专家学者对这方面内容展开了研究，例如文献[11]采用“领先辅助”代理的分布式控制策略验证智能电网信息-物理网络系统的稳定性；文献[12]综合考虑电网安全性和稳定性，提出一种基于复杂网络理论和效用风险理论的配电网关键节点辨识方法；文献[13]应用最大流理论，对基于 Petri 网的配电网信息物理系统中元件状态进行可靠性评估，分析推理故障后果，避免遍历过程，提升了评估效率；文献[14]把改进的潮流模型与复杂网络模型相结合，建立了两层网络-物理电网模型，分析并解决了网络-物理功率耦合网络建模和仿真中的合理简化，以及有效的协调机制设计；文献[15]提出基于关联特性矩阵的电网信息物理耦合系统建模方法，对物理层、信息层、信息物理耦合层进行分析并描述各层之间的关联性；文献[16]探索了对于微电网信息物理系统的 3 层建模方法，分析并展示了微电网各单元的运行状态及其变化过程；文献[17]提出了一种基于关联矩阵建模分析的配网 CPS 安全评估方法，通过建立信息物理故障影响的框架，分析了信息物理故障的相关性和影响；文献[18]建立了配电网 CPS 终端仿真、分布式电源、通信网络、控制层以及中间人攻击和虚假数据注入模型，仿真分析了数据篡改和虚假注入数据对控制过程的影响，为配电网 CPS 安全事件的识别和防控提供了理论基础；文献[19]构建了配电网 CPS 仿真平台，验证了双模式自适应控制(improved droop characteristics-based bi-mode adaptive control, DBAC)方法可实现高比例光伏跨台区消纳；文献[20]基于 Markov 模型建立多时段状态概率模型，并进行了性能评估；文献[21]通过建立能够反映功率-信息耦合特性的配电网 CPS 相关矩阵模型来探索信息故障与物理故障之间的关联性；文献[22]从电网信息物理融合建模技术、分析方法，基于融合模型的电网控制技术，基于融合模型的形式化验证 4 个方面说明了电网与 CPS 的融合性；文献[23]从电网信息物理系统融合建模、模型验证、信息-物理交互机理分析及电网控制 4 个方面指出电网 CPS 可为发展智能电网形态提供理论基础。以上研究均针对信息-物理的耦合特性进行分析，可见新型配电网信息流和能量流的融合已经成为电网发展的必然趋向，但目前尚并没有将业务流进行耦合，没有形成体系的多流信息物理融合仿真分析手段。

在配电网状态转换分析以及控制方面，文献[24]基于有限状态机矩阵的形式，将系统多重运行状态及相互切换过程进行数学描述，实现了直流配电控制领域的平滑切换和精细化控制；文献[25]利用有限状态机(finite state machine, FSM)来定义电压下降或膨胀故障时 SOGI-FLL 频率响应的不同状态；文献[26]提出一种基于静态矩阵的方法，从有限状态机结构方面出发，而非动态转换过程，从而避免了现有方法中固有的维度不确定问题；文献[27]提出了基于 SD 卡的有限状态机设计，将有限状态机的状态转换图转换成树状状态转换图，克服了对输入信号的依赖，其简化有限状态机的设计思路具有参考价值；文献[28]基于有限状态机模型，描述了微电网的分布式能源建模方法，并比较了 FSM 模型和纯动态仿真模型，指出 FSM 是一种很好的长期动态仿真解决方案，可以用于研究微网格未来可能的操作方式。以上研究体现了有限状态机在结构以及动态转换方面的应用优势，可以为新型配电网的多流融合仿真提供理论支撑。

综上所述，新型配电网运行状态复杂多变，多流耦合使得对其运行控制策略难以取舍，对其仿真和分析手段不足。因此本文针对新型配电网多流模块，提出了基于有限状态机的新型配电网多流融合仿真引擎，考虑支路状态和联络开关状态，设计有限状态机，对系统进行精细化的状态划分，并制定

详细的控制策略。最后基于 Matlab/Simulink 建立改进的 IEEE33 节点新型有源配电网模型，以新型配电网线路短路故障重构恢复为研究场景，并与能量流、信息流和控制流高度融合进行状态建模，采用 3 层仿真模型进行分析，以验证所提方案的正确性和有效性。

1 新型配电网的 CPS 与多流融合

1.1 信息物理系统(CPS)

CPS 可以分为以离散化数字为基础的信息系统和以连续过程为基础的物理系统，两者时刻处于动态耦合状态，满足了新型配电网实时控制和可靠性的要求。

具体而言，新型配电网运行时，信息系统的数据采集设备收集物理系统有关状态的参数信号，并转化为离散的数字信息(输入信息)，计算设备对其进行传输、转换、计算等处理后形成控制指令(输出信息)，传入控制系统中。控制系统中的控制单元和执行器将指令进行处理、打包，将最终指令作用在连续的物理系统中，即改变物理系统的能量流分布。从新型配电网的运行中可以看出，信息物理系统的交互过程为能量流→信息流→控制流→能量流的循环作用过程。如图 1 所示，新型配电网信息系统监视、识别、采集物理系统的运行状态，同时信息系统在处理完输入信号后将控制指令作用在物理系统上。

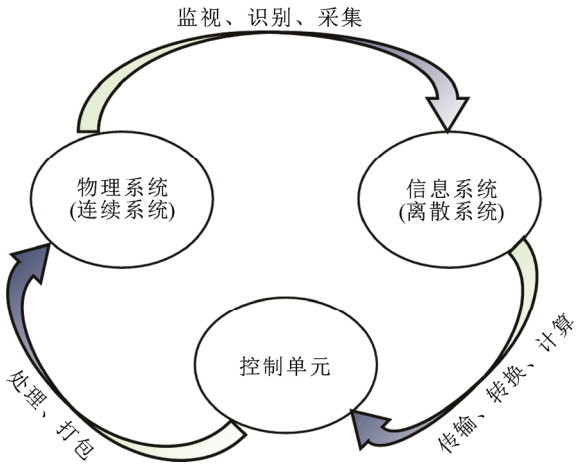


图 1 物理系统和信息系统交互过程

Fig.1 Physical system and information system interaction process

1.2 新型配电网的多流融合

新型配电网业务包含故障定位、故障重构、无功补偿、风险分析、用户信息采集系统、稳态仿真、暂态仿真等业务功能，这些业务功能应用在新型配电网运行过程中会不断变换，各个业务功能可能单独产生，也可能同时发生，这些业务之间以新型配电网运行状态的形式迁移变换，构成新型配电网的业务流。

如图 2 所示，新型配电网的业务流通过信息通信手段(user datagram protocol, UDP)与物理系统和仿真模型通信，进而实现上层业务单元与下层能量-信息-控制单元的融合。在业务流的通信中，建立状态转移引擎，状态转移引擎接收信息流的数据，解析数据并提取业务流功能指令，然后将指令代码转换为仿真模型可执行的顺序控制操作，根据新型配电网仿真模型的运行状态控制新型配电网进行仿真，并将仿真信息通过信息流反馈给上层业务应用单元。

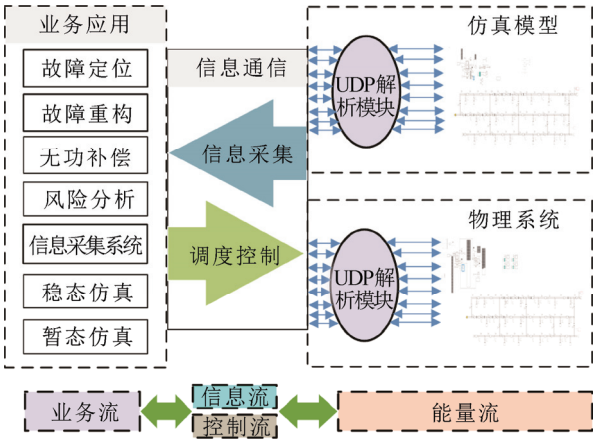


图 2 新型配电网多流融合过程

Fig.2 Multi-flow fusion process of distribution network

本文采用并行实时仿真和查询库的方法，提出的多流融合仿真引擎重在描述通过状态转移方式实现业务流的上传下达功能，在模型的上位机中建立上层业务单元，采用并行实时仿真的方法验证所提方法的有效性，同时通过查询库的形式减少仿真时间。在上层业务单元中，各业务应用均采用库的形式表现，不同的库对应不同的业务流，然后根据不同的库对不同业务应用场景进行实时仿真，同时仿真时也会查询对应库的内容，主要目的是提高针对各业务应用场景的实时仿真速度，快速实现数模混合仿真和业务场景复现，同时可以实现配电系统的优化运行决策和建议。

2 基于有限状态机的状态转移引擎

2.1 有限状态机模型

有限状态机通过感知过程与执行过程的结合

耦合连续事件及离散事件，进而实现对整个系统的多流融合控制。

如图 3 所示，FSM 为状态控制器，信息系统生成的离散信号通过有限状态机的状态判断生成控制信号，控制信号驱动物理系统状态发生改变，有限状态机借此有效连接离散信息和连续信息。FSM 模型用来模拟信息物理系统中的控制中心，模拟接收状态感知信息并输出控制指令的过程，能够采集信息物理模型的状态信息，并根据采集数据发出控制指令改变物理系统的运行方式。

2.2　有限状态机数学描述

有限状态机表示的是有限个状态切换的数学模型，由有限个状态和状态之间的转移组成。有限状态机模型对新型配电网内部产生相应的控制策略，通过对内部元件的控制实现相应的状态转移。将有限状态机的内部控制策略分为输入集、输出集、状态集以及状态转移集，可用数学方程描述为：

$$\begin{cases} S_{\mathrm{FSM}} = (s_0, i, o, f, g) \\ s_{n+1} = f(s_n, i_n) \\ o_n = g(s_n, i_n) \end{cases} \tag{1}$$

式中：S_{FSM} 为有限状态机，代表系统所有的状态；s_0 为系统的初始状态；i 为有限状态机的输入集，表示系统在不同状态下接收到的信息系统数据的集合；o 为有限状态机的输出集，表示系统在接收到信息后通过内部的状态转移规则发出的不同信息指令的集合；f 为状态转移函数，表示系统内部在接收到信息后进行的状态信息切换；g 为输出函数，表示系统受当前状态以及输入集影响下的输出规则；s_n、i_n、o_n 分别为系统在 n 时刻时的状态、输入信号、输出信号。

式(1)表明，系统处于 s_n 状态时，输入信号为 i_n，输出信号为 o_n，可以通过状态转移函数以及输出函数将系统的状态由 s_n 转移为 s_{n+1}，并向外输出 o_n。

有限状态机有效连接离散信息和连续信息是经过状态转换实现的：

1）建立各 FSM 通用通信协议包，如图 4 所示。协议包由系统编号、系统运行状态、系统中所有开关状态、系统中各节点电压信息等组成。有限状态机从系统编号开始读取并解析。

2）物理系统侧，FSM 控制器时刻监测物理系统的连续信息和运行状态，并将其发送给上位机；在上位机侧，FSM 控制器解析物理侧的连续信息和状态，提取出离散的事件信息，并传送给模拟仿真

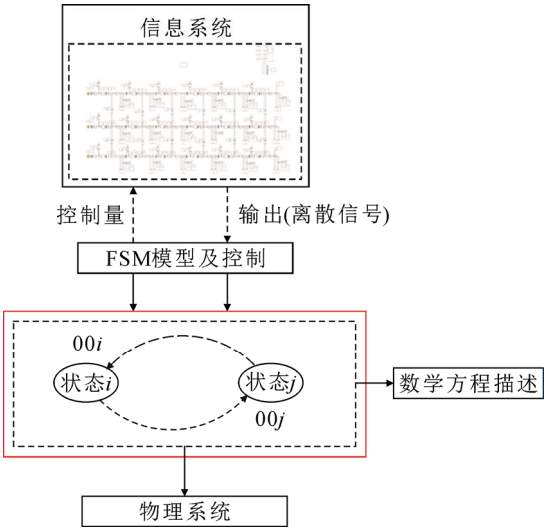


图 3　有限状态机模型

Fig.3　Finite state machine model



图 4　FSM 通信协议包

Fig.4　FSM communication protocol package

系统进行离散化仿真，将经过优化的离散仿真指令经上位机传送到物理侧进行执行。

3　新型配电网的故障重构业务流

3.1　故障重构

当物理系统侧某一节点发生故障后，会通过以下方式进行故障重构，如附录 A 附图 A1 所示。

1）物理系统经延时后进行重合闸操作，当各节点两端电流信息满足规定差值时，故障解除；不满足规定差值时，锁定故障信息，并通过 UDP 与上位机建立通信。

2）上位机接收到故障信息后，处理信息并定位故障支路开关库中的支路开关状态，下发至模拟仿真机，模拟仿真机复制物理系统故障状态。故障支路开关库如表 1 所示。

3）上位机查询重构库，并发送开关状态指令信息至模拟仿真机，模拟仿真机根据指令信息进行故障重构，重构库如附录 A 表 A1 所示，其中 G_m^n 为路径，m 为节点，n 为重构路径编号；重构路径如图 5 所示，其中 FSM-S_0 为正常状态，FSM-S_1 为故障状态，FSM-S_2 为离网状态，b_i 为支路开关信号。

4）上位机处理重构后的电流电压信息，并确定最优路径，最终将最优路径信息发送至物理系统，解除故障。

表 1 故障支路开关库

Table 1 Faulty branch switch library

节点	开关编号	开关状态	节点	开关编号	开关状态	节点	开关编号	开关状态
1	k1, k2	0,0	12	k17, k18	0,0	23	k33, k34	0,0
2	k2, k3	0,0	13	k16, k17	0,0	24	k32, k33	0,0
3	k3, k4	0,0	14	k15, k16	0,0	25	k31, k32	0,0
4	k5, k6	0,0	15	k19, k20	0,0	26	k29, k30	0,0
5	k6, k7	0,0	16	k20, k21	0,0	27	k28, k29	0,0
6	k7, k8	0,0	17	k21, k22	0,0	28	k28	0
7	k9, k10	0,0	18	k23, k24	0,0	29	k35, k36	0,0
8	k10, k11	0,0	19	k24, k25	0,0	30	k36, k37	0,0
9	k11, k12	0,0	20	k25, k26	0,0	31	k37, k38	0,0
10	k13, k14	0,0	21	k26, k27	0,0	32	k39, k40	0,0
11	k14	0	22	k27	0	33	k40	0

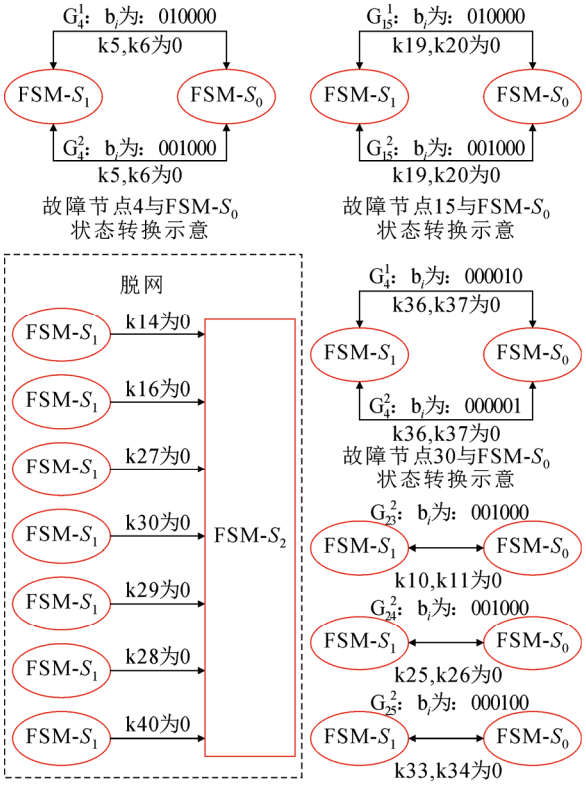


图 5 系统重构路径状态转换示意图

Fig.5 System reconstruction path status conversion diagram

3.2 状态策略与通信格式

系统的状态转移引擎决定了系统运行状态的切换，状态发生转移就需要建立协调控制策略，或为物理系统控制单元切换状态，或为上位机状态的转移，或为模拟仿真机的动作与等待等。整个系统基本运行的状态控制策略定义如表 2 所示，整个系统的通信逻辑以及状态逻辑如附录 A 表 A2 所示。

表 2 状态控制策略定义

Table 2 Definition of state control strategy

系统	状态	具体策略定义
物理系统	1	正常状态
	2	故障状态
	3	延时等待状态
	4	延时等待状态
	5	重合闸状态
	6	等待重合闸状态
	7	与上位机通信状态
上位机	0	正常状态
	1	与模拟仿真机循环通信状态
	2	等待第 1 次重构状态
	3	第 2 次重构状态
	4	与物理系统通信状态
	5	结束状态
模拟仿真机	0	正常状态
	1	开关复制状态
	2	延时控制状态
	3	延时控制状态
	4	延时控制状态
	5	正常状态
模拟仿真系统	7	接收信息状态
	8	仿真运行状态
上位机指令信息	10	与模拟仿真机通信指令
	11	接收模拟仿真机信息指令
	12	物理系统故障解除指令

具体策略和逻辑分为物理系统故障预处理模块、故障复制模块、循环通信模块和重构模块，详细流程为：

1）物理系统中故障定位模块采集各节点电流，通过差值判断方法确定系统的故障节点，并将故障节点两端的支路开关断开，同时传递故障节点信息到物理系统中的数据处理模块。

2）数据处理模块收到故障信息之后，首先延时等待，物理系统启动重合闸操作，将重合闸处理后的电流差值进行再判断，若电流状态正常，则故障解除；若重合闸失败，则将故障信息锁定，同时数据处理模块将自身状态转换为 6，将故障信息和故障开关状态传递给上位机，并在传递结束后自身状态转换为等待状态 7。故障预处理过程如图 6 所示，图中具体数值为程序变量参数。

3）上位机最初处于 0 等待状态，判断收到来自物理系统的故障信息之后，建立与模拟仿真机的通信，确定模拟仿真机处于正常运行接收状态，将物理系统的故障开关状态传递给模拟仿真机进行复制；同时上位机状态切换 1 状态，进入与模拟仿真机的循环通信状态。

4）模拟仿真机最初为 0 等待状态，收到上位机的故障开关状态信息之后，所有开关根据上述信息进行开关动作，同时状态切换为 1 状态，即进入故障重构状态，并进行延时等待。故障复制模块如图 7 所示，图中的变量和参数为模拟仿真机流程控制状态量，延时控制形式为脉冲信号和模拟仿真机的状态同时控制，按照设定的脉冲周期，模拟仿真机的状态切换为 2、3、4。

5）上位机在 1 状态(循环通信状态)下接收到模拟仿真机信息，判断信息来源为模拟仿真机(编号为 3)，同时判断模拟仿真机仿真状态为 8，此时发送指令信息(编码为 11)，同时上位机切换到 2 状态(等待状态)。

6）模拟仿真机接收到上位机发来的 11 指令信息，切换为 5 状态，同时启动模拟仿真模型运行，仿真完成后，将仿真结果如各节点电压、电流等信息发送给上位机，并且切换到 0 状态。

7）上位机在处于 2 状态下接收模拟仿真机的信息，对信息进行统计分析后，根据业务流查询库的条目情况，继续循环进行下一次通信和控制指令(编码为 10)，循环通信模块如图 8 所示。

8）模拟仿真机在 4 状态时接收到上位机发来的 10 指令信息(该信息包含重构开关状态信息)，控制模拟模型所有开关根据上位机发送的开关指令动作，即进行第一次重构，状态切换为 1 状态，进入故障重构。

9）上位机在 3 状态(第 2 次重构状态)下接收到模拟仿真机仿真反馈信息，对信息进行统计分析后，重构路径编号加 1，若此时的路径编号小于重构库中的路径条数，则切换到 2 状态，同时发送第 2 次重构信息；若此时的路径编号大于重构库中的路径条数，则统计分析出最佳路径后，切换到 4 状态，即上位机与物理系统通信状态。

10）模拟仿真机接收到上位机发来 11 指令，切换到 5 状态，继续进行模拟模型的重构仿真。第 1 次重构模块如图 9 所示。

11）物理系统处于 7 状态(等待状态)下接收上位机信息，判断为重构仿真完成信息后，接收上位机发来的重构开关动作指令，完成物理系统的重构，同时状态切换到 1 正常状态。

12）物理侧重构完成后，发送给上位机重构恢复完成信号(编码为 12)，上位机切换到 0 状态。

至此故障重构仿真有限状态机设计完成。

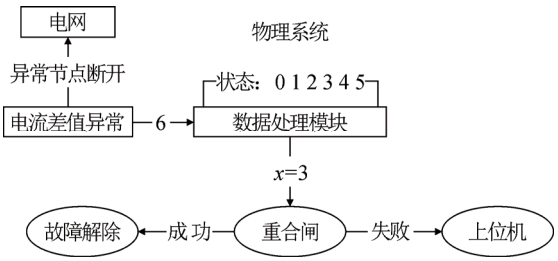


图 6　物理系统故障预处理模块

Fig.6　Physical system fault preprocessing module

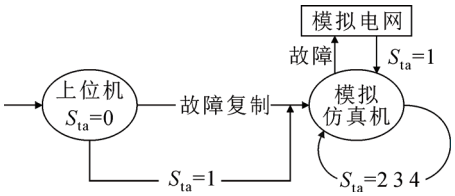


图 7　故障复制模块

Fig.7　Failed replication module

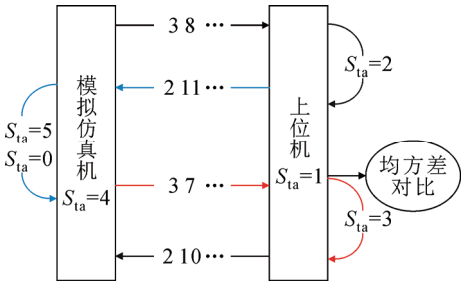


图 8　循环通信模块

Fig.8　Cyclic communication module

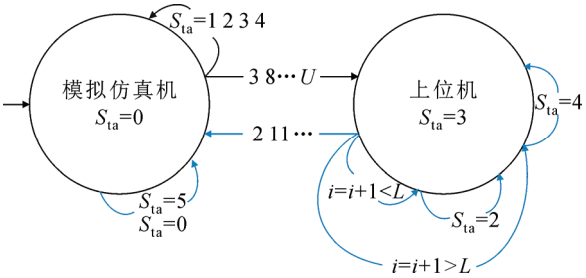


图 9　重构模块

Fig.9　Refactoring module

3.3　状态转移

将新型配电网的运行过程划分为有限个运行状态相互转移的过程，基于有限状态机建立新型配电网运行状态转移逻辑，运行状态转移与仿真方案切换之间相互对应。据此在物理系统、上位机和模拟仿真机中分别形成各自的有限状态转移逻辑。

研究基于事件驱动的新型配电网多状态仿真引擎，通过监测运行参数的变化自动识别运行状态转移过程，驱动仿真模型及方法的自动切换。

图 10 为物理侧状态转换，描述了模拟真实电网发生短路故障时状态的详细切换过程。

图 11 为上位机侧状态切换图，描述了上位机在物理系统重合闸之后整个状态切换的详细过程，其中与模拟仿真机的通信极为频繁。由此可以看出，3 层系统的整个故障分析及模拟仿真均在上位机和模拟仿真机之间进行，避免了真实物理系统在故障时进行动作造成不必要的影响。

图 12 为模拟仿真机侧状态转换图。模拟仿真机接收上位机信息流传达的控制指令，复制物理系统的故障信息，进行全部的仿真实验，包括有无 DG 情况下的故障重构等。

4 仿真实验与分析

物理系统模拟真实电网，用物理系统故障演示电网故障。本文基于先进配电网实时仿真机(advanced distribution network simulator, ADN-SIM)，状态机控制部分采用 Matlab/Simulink 编程和建模。如附录 A 附图 A2 所示，建立 IEEE 33 节点 10 kV 电源的新型配电网，图中 DG 为分布式电源，正常运行条件下为断开状态，故障发生时可根据代码指令在故障重构状态进行动作。虚线部分 b_i 为联络开关，其中 i=1，2，3，4，5，6，正常运行状态下联络开关为断开状态，k_i 为支路开关，其中 i=1，2，3，…，39，40。基于上述的通信形式和状态转移逻辑，在 15 节点处制造 3 项短路故障，其余节点均处于正常接通状态，进行实验分析。

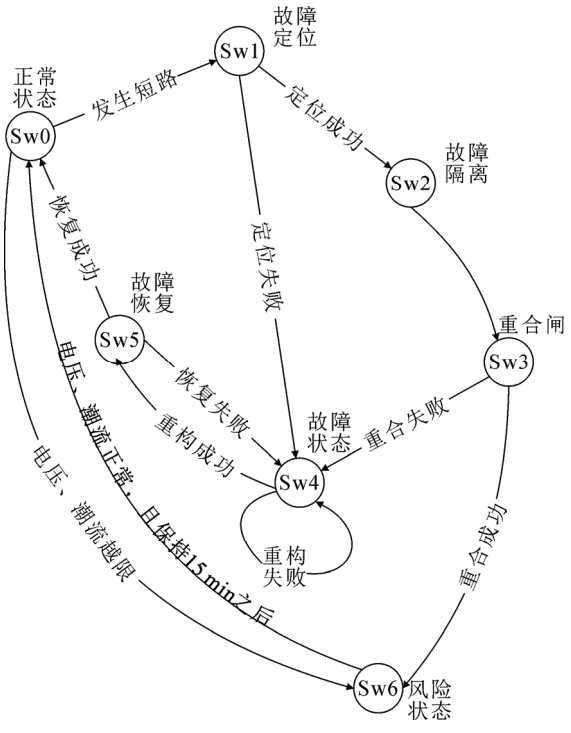


图 10 物理侧状态转换

Fig.10 Physical side state transition

4.1 仿真运行状态分析

图 13 展示了物理系统、上位机、模拟仿真机 3 层系统的状态切换仿真结果情况，由图 13 可知，物理系统的状态切换发生在上位机和模拟仿真机状态切换之前，且物理系统重合闸状态结束后才与上位机进行通信；上位机与模拟仿真机在故障重构期间

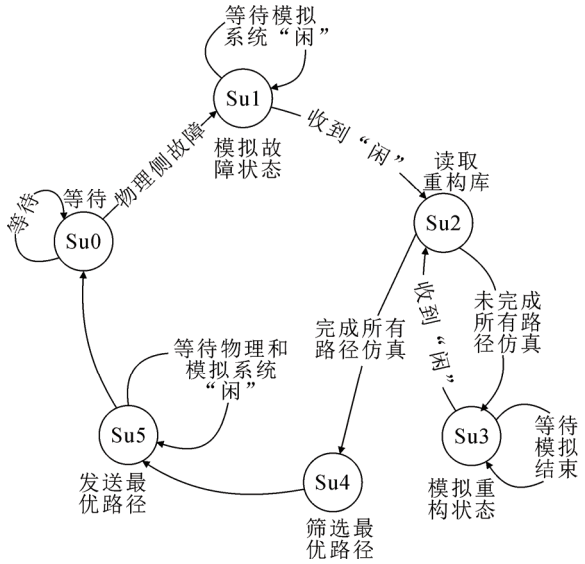


图 11 上位机侧状态转换

Fig.11 State change on the upper computer

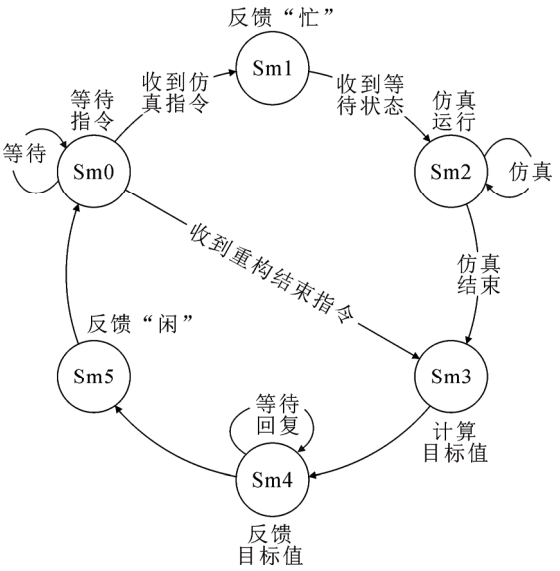


图 12 模拟仿真机侧状态转换

Fig.12 Simulates the emulator side state transition

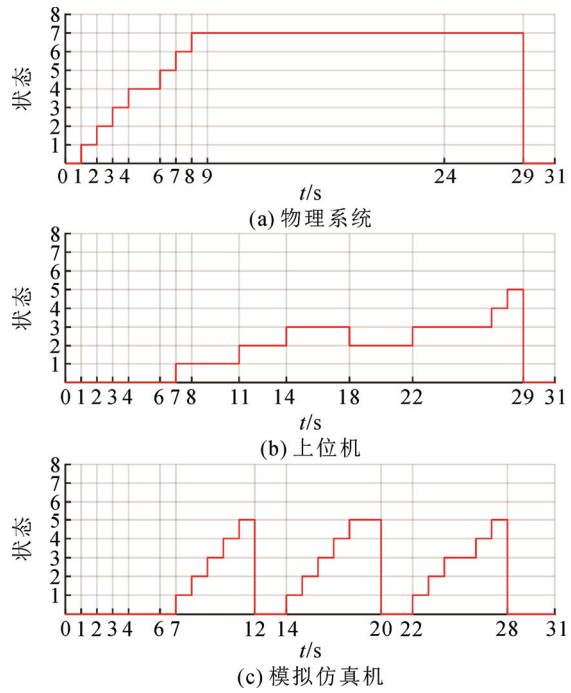


图 13　故障发生后的状态切换

Fig.13　State switching after a fault occurs

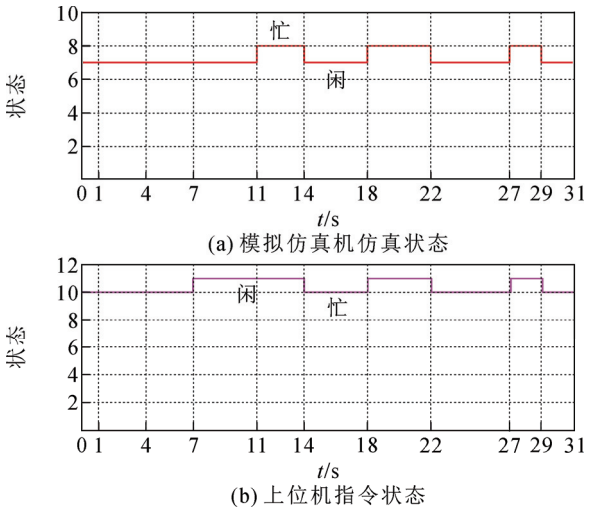


图 14　仿真指令状态切换

Fig.14　Simulation instruction state switching

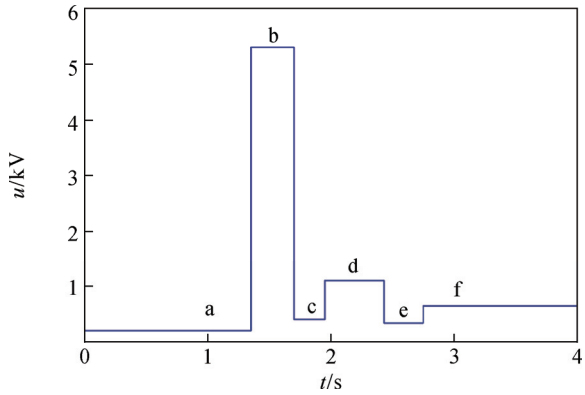


图 15　重构过程中均方差结果对比

Fig.15　Comparison of the error results in the reconstruction process

进行循环通信。由此可以看出，3 层系统状态切换和输出的协调控制与上文描述的完全一致。以 t=11 s 为例，物理系统处于 7(与上位机通信状态)状态，上位机处于 2(等待第 1 次重构状态)状态，通信格式为：上位机发出的信息指令编号 2，信息的接收方为模拟仿真机，编号为 10，支路开关信号(11…00…11)，第 1 次重构联络开关信号(01 000 0)，模拟仿真机处于 4(延时控制状态)状态，此时第 1 次重构开始进行。图 14 中的模拟仿真机仿真状态为忙，上位机指令状态为闲，刚好验证代码的状态通信过程。

4.2　结果分析

4.2.1　仿真过程结果分析

模拟仿真机每经过一次故障重构后都会向上位机返回所有节点的电压与标准值比较下的均方差。如图 15 所示，模拟仿真机处于无故障运行状态下电压均方差较小，当接收到上位机故障信号并复制物理系统的故障后，均方差突变到峰值。故障产生后，在拓扑系统中无 DG 与有 DG 条件下分别进行 2 次相同路径的重构，可以明显看出，模拟仿真系统中无 DG 时，第 1 次重构路径均方差要比第 2 次重构路径均方差小；模拟仿真系统中有 DG 加入时第 1 次和第 2 次重构的均方差均减小。从结果图中可以看出，DG 的有无会对同一重构路径下的电压均方差产生影响，表 3 说明了均方差变化各阶段的具体含义。由仿真 e 阶段的电压均方差最小可以得出结论，该情况下的重构路径要优于其他 3 种情况下的重构路径，并且最接近于无故障运行条件下的电压均方差。综上，上位机对电压均方差进行比较之后会将第 1 条含 DG 的重构路径信息发送至物理系统，解除当前故障。

从另一方面也可以验证，图 16 为 17 节点整个仿真过程中的具体电压变化情况，从图中可以看出第 1 阶段为无故障运行时 17 节点的电压信息，第 2 阶段是故障发生时的电压数据 0。故障产生后电压变化分为 4 个阶段，分别为无 DG 下的 2 次重构和有 DG 下的 2 次相同路径重构，有 DG 下的电压值明显比无 DG 下的电压值要更接近于无故障运行时的电压值，从该图中也可以看出，有 DG 存在下的第 1 次重构路径为最优路径。

表 3 均方差变化过程各阶段含义

Table 3 Meaning of each stage of variance change process

名称	a	b	c	d	e	f
阶段含义	无故障	故障发生	无 DG 第 1 次重构	无 DG 第 1 次重构	有 DG 第 1 次重构	有 DG 第 2 次重构

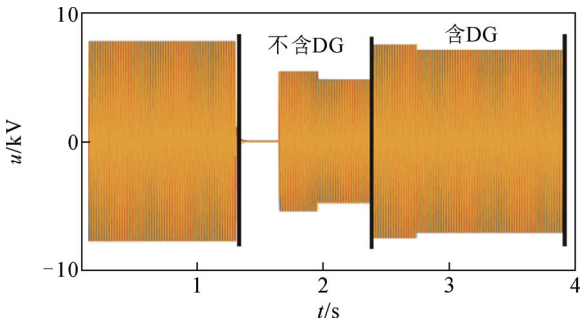


图 16 重构仿真过程中第 17 节点电压波形

Fig.16 Voltage waveform of the 17th node in the reconstruction simulation process

4.2.2 不同算法的仿真结果对比

传统的配电网业务应用优化算法包括 NSGA2 算法[29]、克隆遗传算法(Clonal genetic algorithm, CGA)、克隆遗传退火算法(Clonal genetic simulated annealing algorith, CGSA)和模拟退火算法(simulated annealing algorithm, GSA)[30]。各算法都具有不同的优点，NSGA2 算法能够同时考虑各目标函数的优化进程，提高算法性能和效率；克隆遗传算法的基本思想是取消传统遗传算法的交叉算子，可以简化遗传操作，提高计算效率；模拟退火算法用于解决组合优化问题的想法，可避免陷入局部极小；克隆遗传退火算法收敛迅速。

本文提出的多流融合仿真引擎基于并行实时仿真和查询库的方法，与传统的优化方法不同，本文分别在网损、仿真时间上相比较，得出的结论如表 4 所示，其中传统的算法数据引用文献[30]。可以看出，本文所提出的多流融合仿真引擎在网损上与传统优化算法得到的结果相似，最佳重构路径的网损率为 2.43%；但在仿真时间上，相比传统的优化算法，本文所提方法的仿真时间更快，约为 1.21 s，仿真时间减少为传统方法的 20%左右，运行速度更快。

5 结论

1）提出了一种基于有限状态机的新型配电网多流融合仿真引擎，构建了基于实时快速仿真的融合仿真架构，该架构连接物理系统和实时仿真系统，可以实现物理运行状态的实时仿真复现，并且理论上可以接入主控系统实现状态决策与控制。

表 4 不同算法下故障重构仿真结果对比

Table 4 Comparison of simulation results of fault reconstruction under different algorithms

参数	传统优化算法				多流融合仿真引擎		
	重构前	CGSA	CGA	GSA	重构前	无 DG 重构	有 DG 重构
网损/%	3.62	2.49	2.52	2.49	3.73	2.61(路径 1) 2.53(路径 2)	2.43(路径 1) 2.48(路径 2)
电压偏差均方根/%	—	—	—	—	—	3.31(路径 1) 9.00(路径 2)	2.25(路径 1) 5.85(路径 2)
仿真时间/s	—	6.169	12.80	19.35	—	1.21	1.21

2）设计了物理层、上位机、实时仿真层之间的状态互动控制方案，以及各层内部的状态控制转换策略，并以新型配电网故障重构应用场景为例，接入融合仿真引擎，优选最佳故障重构路径。算例仿真结果表明，所设计的方案能够有效结合新型配电网控制系统，通过通信和控制，实现新型配电系统的故障定位与重构。

3）基于并行实时仿真和查询库方法的多流融合仿真引擎与传统的优化算法相比，在网损率结果相似的情况下，仿真运行速度更快，仿真时间减少为原来的 20%左右，提升了系统运行的流畅性。

4）所提方案能够为新型配电网的数模混合仿真、运行场景复现与优化运行提供技术支撑，将来有望形成具有自主知识产权的新型配电网多流融合仿真平台，开展配电网状态镜像、风险分析、运行决策、装置检验等业务。

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

参考文献 References

[1] 王强强，姚良忠，盛万兴，等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力提升方法[J]. 电力系统自动化，2023，47(18)：132-141. WANG Qiangqiang, YAO Liangzhong, SHENG Wanxing, et al. Enhancement method for distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network based on chance-constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 132-141.

[2] 唐 巍，张起铭，张 璐，等. 新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. 电力系统自动化，2023，47(6)：2-17. TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17.

[3] 詹惠瑜，刘科研，盛万兴，等. 有源配电网故障诊断与定位方法综

述及展望[J]. 高电压技术，2023，49(2)：660-671.
ZHAN Huiyu, LIU Keyan, SHENG Wanxing, et al. Review and prospects of fault diagnosis and location method in active distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 660-671.

[4] 刘科研，盛万兴，赵鹏杰，等. 基于一致性算法的跨台区光伏分布式控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4431-4439.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAO Pengjie, et al. Distributed control strategy of photovoltaic cross-district based on consistency algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4431-4439.

[5] 刘科研，任昭颖，王　瑶. 基于控保协同的多端柔性直流配网故障测距方法[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3458-3466.
LIU Keyan, REN Zhaoying, WANG Yao. Fault location method for multi-terminal flexible DC distribution network based on control and protection coordination[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3458-3466.

[6] 汤　奕，王　琦，倪　明，等. 电力信息物理融合系统中的网络攻击分析[J]. 电力系统自动化，2016，40(6)：148-151.
TANG Yi, WANG Qi, NI Ming, et al. Analysis of cyber attacks in cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 148-151.

[7] 何瑞文，汪　东，张延旭，等. 智能电网信息流的建模和静态计算方法研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1527-1535，1790.
HE Ruiwen, WANG Dong, ZHANG Yanxu, et al. Modeling and static calculation method of the information flow on smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1527-1535, 1790.

[8] 朱　丽，叶学顺，孙　勇. 基于触发同步的配电网信息物理系统实时仿真方法[J]. 电力自动化设备，2023，43(4)：127-134.
ZHU Li, YE Xueshun, SUN Yong. Real-time simulation method of distribution network cyber physical system based on trigger synchronization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 127-134.

[9] 闫　涛，李　蕊，刘　伟，等. 基于改进停电序列多状态模型的新型配电系统故障恢复方案解析优选方法[J]. 电网技术，2023，47(2)：473-481.
YAN Tao, LI Rui, LIU Wei, et al. Analytic optimization method of fault recovery scheme for new distribution network based on modified multi-state power interruption sequence model[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 473-481.

[10] 葛磊蛟，杜天硕，孙　冰. 分布式光伏功率数据的 IMOWOA 和 LightGBM 混合虚拟采集方法[J]. 中国电机工程学报，2024，44(3)：1035-1046.
GE Leijiao, DU Tianshuo, SUN Bing. Hybrid virtual collection method of IMOWOA and LightGBM for distributed PV power data[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1035-1046.

[11] CHEN S M, LI K Q. Distributed optimal control of transient stability for a power information physical system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1393216.

[12] 张　稳，盛万兴，刘科研，等. 高渗透率分布式电源按节点关键性接入配电网的运行风险评估[J]. 高电压技术，2021，47(3)：937-945.
ZHANG Wen, SHENG Wanxing, LIU Keyan, et al. Operation risk assessment of high penetration distributed generation connected to distribution network according to node criticality[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 937-945.

[13] 李宏仲，郭相辰. 基于 Petri 网的配电网信息物理系统可靠性评估[J]. 电网技术，2023，47(1)：347-359.
LI Hongzhong, GUO Xiangchen. Reliability evaluation of cyber-physical system of distribution network based on Petri net[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 347-359.

[14] ZHAO Z H, ZHOU T Y, WANG Q X, et al. Research on modeling and simulation of CPPS and its cascading failure mechanism[C] // Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Software Engineering and Service Science. Beijing, China: IEEE, 2021: 42-47.

[15] 薛禹胜，李满礼，罗剑波，等. 基于关联特性矩阵的电网信息物理系统耦合建模方法[J]. 电力系统自动化，2018，42(2)：11-19.
XUE Yusheng, LI Manli, LUO Jianbo, et al. Modeling method for coupling relations in cyber physical power systems based on correlation characteristic matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 11-19.

[16] 杨　义，杨　苹. 面向集中式控制的微电网信息物理系统分层建模方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(19)：7088-7101.
YANG Yi, YANG Ping. The hierarchical modeling approach for centralized control microgrid cyber physical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7088-7101.

[17] YANG Z, ZHOU X, NI M, et al. A security assessment of distribution network CPS based on association matrix modeling analysis[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 853(1): 012011.

[18] 梁　英，王耀坤，刘科研，等. 计及网络信息安全的配电网 CPS 故障仿真[J]. 电网技术，2021，45(1)：235-242.
LIANG Ying, WANG Yaokun, LIU Keyan, et al. CPS fault simulation of distribution network considering network information security[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 235-242.

[19] 刘科研，盛万兴，赵鹏杰，等. 信息物理环境下基于电力电子变压器的跨台区光伏消纳策略[J]. 电力自动化设备，2020，40(12)：66-72，87.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAO Pengjie, et al. Photovoltaic consumption strategy across multiple transformer districts based on PET under cyber physical system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 66-72, 87.

[20] 郑焕坤，吕婷婷，孙耀斌，等. 考虑信息设备故障的综合能源信息物理系统可靠性分析[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3078-3087.
ZHENG Huankun, LYU Tingting, SUN Yaobin, et al. Reliability analysis of integrated energy cyber physical system considering information equipment failure[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3078-3087.

[21] ZHOU X, YANG Z, NI M, et al. Analysis of the impact of combined information-physical-failure on distribution network CPS[J]. IEEE Access, 2020, 8: 44140-44152.

[22] 刘　东，盛万兴，王　云，等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3522-3531.
LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531.

[23] 秦博雅，刘　东. 电网信息物理系统分析与控制的研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报，2020，40(18)：5816-5826.
QIN Boya, LIU Dong. Research progresses and prospects on analysis and control of cyber-physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5816-5826.

[24] 刘海涛，熊　雄，季　宇. 基于有限状态机转换矩阵建模的直流配电系统精细化控制[J]. 中国电力，2021，54(10)：89-96.
LIU Haitao, XIONG Xiong, JI Yu. Precise control of DC distributed system based on finite state machine matrix modeling[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 89-96.

[25] NEJAD S A, MATAS J, MARTÍN H, et al. New SOGI-FLL grid frequency monitoring with a finite state machine approach for better response in the face of voltage sag and swell faults[J]. Electronics,

2020, 9(4): 612.
[26] DENG H, YAN Y Y, CHEN Z Q. A matrix-based static approach to analysis of finite state machines[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2022, 23(8): 1239-1246.
[27] 胡正伟，刘 威. 基于 SD 卡的有限状态机的模块化设计[J]. 电子设计工程，2021，29(4)：1-6.
HU Zhengwei, LIU Wei. Modular design of finite state machine based on SD card[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(4): 1-6.
[28] KAJANOVA M, BRACINIK P, ROCH M. Utilization of finite state machine approach for microgrid modeling[J]. Electrical Engineering, 2020, 102(1): 53-63.
[29] 张 磐，唐 萍，丁 一，等. 考虑分布式发电波动性的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2018，30(1)：115-120.
ZHANG Pan, TANG Ping, DING Yi, et al. Service restoration strategy considering the volatility of distribution generations for active distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 115-120.
[30] 周 辉. 基于克隆遗传退火算法的配电网重构的研究[D]. 长沙：中南大学，2007.
ZHOU Hui. Research on distribution network reconfiguration based on clonal genetic annealing algorithm[D]. Changsha, China: Central South University, 2007.



刘科研
1978—，男，博士，教授级高工，硕导
主要从事配电网运行分析、智能有源配电网故障诊断、配电网大数据分析、电网信息物理系统相关的研究工作
E-mail: liukeyan@126.com

LIU Keyan
Ph.D., Professor



李 昭(通信作者)
1993—，男，博士，工程师
主要从事配电网信息物理系统仿真、分布式电源配电网运行控制相关的研究工作
E-mail: lizhao1@epri.sgcc.com.cn

LI Zhao
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期 2023-04-25 修回日期 2023-11-07 编辑 何秋萍

附录 A

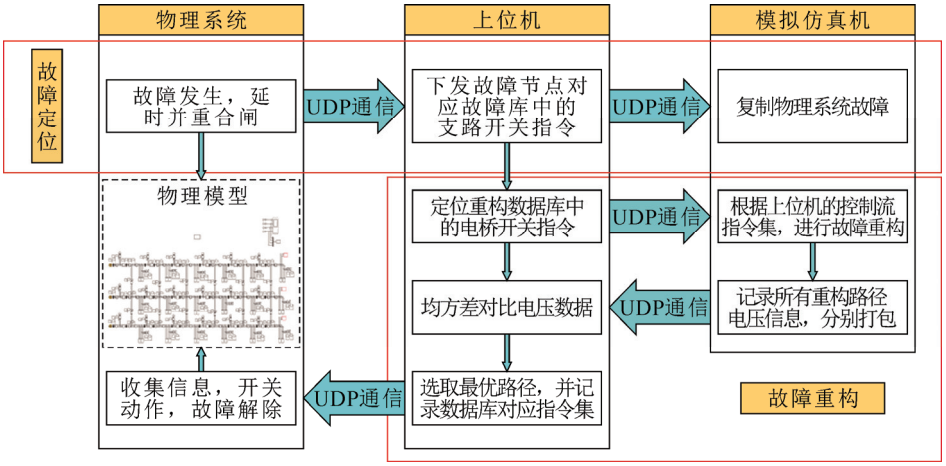


图 A1　实时快速仿真的融合仿真架构

Fig.A1　Fusion simulation architecture for real-time and fast simulation

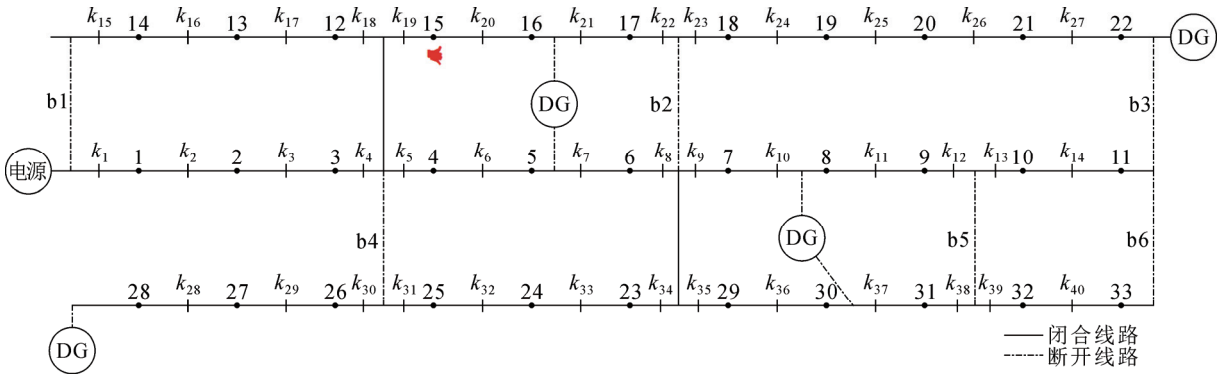


图 A2　15 节点故障算例

Fig.A2　Example of 15th node fault

表 A1　故障重构库

Table A1　Fault reconstruction library

重构数据库		联络开关状态信号	重构数据库		联络开关状态信号	重构数据库		联络开关状态信号
节点	路径	b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6	节点	路径	b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6	节点	路径	b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6
1	*G*1 1	1 0 0 0 0 0	12	*G*1 12	1 0 0 0 0 0	23	*G*1 23	0 0 0 1 0 0
2	*G*1 2	1 0 0 0 0 0	13	*G*1 13	1 0 0 0 0 0	24	*G*1 24	0 0 0 1 0 0
3	*G*1 3	1 0 0 0 0 0	14	脱网	0 0 0 0 0 0	25	*G*1 25	0 0 0 1 0 0
4	*G*1 4	0 1 0 0 0 0	15	*G*1 15	0 1 0 0 0 0	26	脱网	0 0 0 0 0 0
	*G*2 4	0 0 0 1 0 0		*G*2 15	0 0 0 1 0 0	27	脱网	0 0 0 0 0 0
5	*G*1 5	0 1 0 0 0 0	16	*G*1 16	0 1 0 0 0 0	28	脱网	0 0 0 0 0 0
	*G*2 5	0 0 0 1 0 0		*G*2 16	0 0 0 1 0 0	29	*G*1 29	0 0 0 0 1 0
6	*G*1 6	0 1 0 0 0 0	17	*G*1 17	0 1 0 0 0 0		*G*2 29	0 0 0 0 0 1
	*G*2 6	0 0 0 1 0 0		*G*2 17	0 0 0 1 0 0	30	*G*1 30	0 0 0 0 1 0
7	*G*1 7	0 0 1 0 0 0	18	*G*1 18	0 0 0 1 0 0		*G*2 30	0 0 0 0 0 1
8	*G*1 8	0 0 1 0 0 0	19	*G*1 19	0 0 0 1 0 0	31	*G*1 31	0 0 0 0 1 0
9	*G*1 9	0 0 1 0 0 0	20	*G*1 20	0 0 0 1 0 0		*G*2 31	0 0 0 0 0 1
10	*G*1 10	0 0 1 0 0 0	21	*G*1 21	0 0 0 1 0 0	32	*G*1 32	0 0 0 0 0 1
11	脱网	0 0 0 0 0 0	22	脱网	0 0 0 0 0 0	33	脱网	0 0 0 0 0 0

表 A2　融合仿真系统通讯逻辑及状态逻辑

Table A2　Integrate communication logic and state logic of simulation system

系统名称	系统当前状态	系统编号	仿真信号	接收信号	故障编号	节点编号	支路开关	联络开关开关	电压信息
物理系统	0-1-2-3-4-5-	4			6	i	[1 1 1 … 0 0 …]	[0 0 0 0 0 0]	
	6	4			6	i	[1 1 1 … 0 0 …]	[0 0 0 0 0 0]	
	7	4		12			[1 1 1 … 0 0 … 0 0 0 0 0 0]		
上位机	0	2		10			[1 1 1 … 0 0 … 0 0 0 0 0 0]		
	1	2		11					
	2	2		10			[1 1 1 … 0 0 …]	[0 0 1 1 0 0]	
	3	2		11					
	2	2		10			[1 1 1 … 0 0 …]	[0 0 0 0 1 1]	
	4	2		9			[1 1 1 … 0 0 …]	[0 0 0 0 1 1]	
	5-0								
模拟仿真机	0-1-2-3-4	3	8						[0 0 0 U]
	5	3	7						[0 0 0 U]
	0-1-2-3-4	3	8						[0 0 0 U]
	5	3	7						[0 0 0 U]
	0	3	7						[0 0 0 U]