Journal of System Simulation

Volume 31 | Issue 10

Article 17

12-12-2019

GCPS Adaptive Scheduling Model Based on Cooperative Executor

Zhang Jing

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

Chen Yao Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

Sun Jun

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

Hongbo Fan

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

GCPS Adaptive Scheduling Model Based on Cooperative Executor

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that the uncertainty of grid cyber physical systems leads to chain failure, an adaptive GCPS dispatching model based on co-actuator is established. First, the constraint conditions of the system are analyzed. A model constraints of GCPS system is presented to describe the constraint conditions of the power system, and it is proved that it meets the consistency of the measure and representing methods. Second, the optimal value of approximation error is solved by PILOT, and the framework of CA-SADM is described. Finally, the performance index, output power accuracy and the influence of fault on the system are simulated and analyzed by Ptolemy II platform. The experimental results show that the model can describe the output power accurately, and the system has good adaptability to the faults.

Keywords

GCPS, Uncertainty, Real-time, Self-Adaptive Dispatching, Constraint conditions

Recommended Citation

Zhang Jing, Chen Yao, Sun Jun, Fan Hongbo. GCPS Adaptive Scheduling Model Based on Cooperative Executor[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(10): 2112-2121.

第 31 卷第 10 期 2019 年 10 月

基于协同执行器的 GCPS 自适应调度模型

张晶,陈垚,孙俊*,范洪博 (昆明理工大学信息工程与自动化学院,云南 昆明 650500)

摘要: 针对电网信息物理系统的不确定性易导致系统连锁故障的问题,建立基于协同执行器的 GCPS 自适应调度模型;分析了系统约束条件,*提出了一种GCPS 系统模型约束条件刻画电网系统 的约束条件,并证明其度量与表示方法的一致性,通过 PILOT 求解逼近误差最优值*,描述了模型 框架,通过 Ptolemey II 平台对模型的性能指标、输出功率准确度及故障对系统的影响进行仿真分 析,实验结果表明模型可较为准确地描述电源输出功率,且系统对故障有较好的适应能力。 关键词: 电网信息物理系统;不确定性;实时性;自适应调度;约束条件 中图分类号: TP302.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 10-2112-10 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0404

GCPS Adaptive Scheduling Model Based on Cooperative Executor

Zhang Jing, Chen Yao, Sun Jun^{*}, Fan Hongbo

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problem that the uncertainty of grid cyber physical systems leads to chain failure, an adaptive GCPS dispatching model based on co-actuator is established. First, the constraint conditions of the system are analyzed. *A model constraints of GCPS system is presented to describe the constraint conditions of the power system, and it is proved that it meets the consistency of the measure and representing methods. Second, the optimal value of approximation error is solved by PILOT, and the framework of CA-SADM is described. Finally, the performance index, output power accuracy and the influence of fault on the system are simulated and analyzed by Ptolemy II platform. The experimental results show that the model can describe the output power accurately, and the system has good adaptability to the faults.*

Keywords: GCPS; Uncertainty; Real-time; Self-Adaptive Dispatching; Constraint conditions

引言

信息物理系统(Cyber physical systems, CPS)深度融合计算平台、通信网络与控制环境,作为信息化与工业化深度融合的核心技术之一^[1],将成为电



收稿日期: 2017-08-17 修回日期: 2017-11-19; 基金项目:国家自然科学基金(61562051),云南省应 用基础研究计划重点项目(2014FA029): 作者简介:张晶(1974-),男,云南昆明,博士,教 授,研究方向为实时嵌入式控制软件;陈垚(1993-), 男,福建莆田,硕士生,研究方向为信息物理系统。 力能源、物流交通、工业制造等重要行业的关键基础技术。近年来,针对供应侧的智能电网与需求侧的智能楼宇能源系统、企业能源系统、智能家居能源系统等组成的信息物理融合能源系统(Cyber physical energy systems, CPES)为能源系统的节能优化提供了新思路^[2],相关的电网信息物理系统(Grid cyber physical systems, GCPS)利用智能电网技术,综合考虑能源生产的不确定性,实现能源网络需求与供应的动态优化调度,以达到节能、降耗、

第 31 卷第 10 期 2019 年 10 月

减排的目标^[3]。

GCPS 的基本科学问题之一就是刻画电力系 统中复杂信息与物理间的交互关系问题。在 GCPS 系统计算环境与物理环境深度融合的进程中,需要 考虑软、硬件平台交互作用的度量方法与表示的一 致性^[4]。文献[5]提出的混合关系建模为信息系统的 数字工作模式提供了一个结合点。文献[6]考虑发 电机与负荷动态模型,结合 CPS 特性,根据电力 系统约束条件构建了配电网 CPS 模型。文献[7]考 虑 CPS 建模具有多异构性,提出了一种结合 CPS 系统结构与动态行为的协同建模方法, 文献[8]考 虑 CPS 与电网系统结合的时空异构特性,提出了 一种能源互联网模型。文献[9]考虑了 GCPS 的连 锁故障问题,建立了一种电网潮流与延时的 GCPS 连锁故障模型,它分别从物理层与信息层相融合的 角度进行了分析。文献[10]根据动力系统与图论方 法提出了电力网与信息网结合的建模方法,分析了 网络攻击的影响。文献[11]建立 GCPS 稳态与动态 分析模型,提出了一种用于分析电网可靠性与安全 性的思路。当前,GCPS研究领域尚未形成一定的 规模,大多研究成果以解决实际问题为目标,少有 刻画信息、物理融合的本质特征,且缺乏较为完整 的框架与研究方法。

本文针对 GCPS 系统的正确性,创新地构建一 种描述 GCPS 系统的协同执行器网络模型,通过 输入、输出事件标签统一协调任务执行方式,在 满足电力系统特征约束条件下,采用协同执行器 控制方法实现系统自适应调度能力。文中采用超 致密时间(Superdense time, SDT)表达电力系统的 时间约束^[12],采用微分不变式求解不动点方法确 认 GCPS 实时交互行为的唯一性与正确性。

1 系统约束条件分析

电力系统的调度问题主要是发电调度,需要在 给定系统负载需求、运行约束等条件下,使系统执 行任务过程能耗与费用最低,最大化利润与资源利 用率^[13]。

1.1 电网系统约束条件

随着风能、太阳能等可再生能源接入传统电网 系统,电网走向广域协同的复杂网络,所面对的电 力调度问题最大的特点就是不确定性。

定义 1 设电网有 N_U 个不确定发电电源,则集 合 $\psi_u = \{p_u^w(t) | \underline{p}_u^w(t) \le p_u^w(t) \le \overline{p}_u^w(t), u = 1, 2, \cdots, N_U, t = 1, 2, \cdots, T\}$ 表达发电机组可开机数量, ψ_u 所 含空间越小,可开机数量越多。

在 ψ_u 中, $p_u^w(t)$ 表示不确定发电电源在t时刻的发电功率, \underline{p}_u^w 表示开机机组发电下限, \overline{p}_u^w 表示发电上限。

定义2 设有 N_C 个确定发电电源,则电网中包 含可再生能源时,在 N 个场景中,发电机组可行 近似期望目标为确定性发电电源能耗最低,即:

$$\min_{z_{i}^{T}, p_{c,n}^{T}} \sum_{t=1}^{T} \{\sum_{c=1}^{N_{c}} [\sum_{n=1}^{N} \xi_{n} M_{c}^{T} (p_{c,n}^{T}(t)) + M_{c}^{S,T} (x_{i}^{T}(t-1), x_{i}^{T}(t))]\}$$
(1)

式中: x_i^T 为发电机组开关机离散状态变量, z_i^T 为 离散决策变量, $z_i^T = 1$ 时,机器开, $z_i^T = -1$ 时,机 器关。 $M_c^{S,T}$ 为开机启动能耗, $p_{c,n}^T(t)$ 为确定性发 电机在 t 时刻的发电功率, M_c^T 为发电能耗, ξ_n 为 第 n 个场景的权重变量, 有 $0 \leq \xi_n \leq 1$, $\sum_{n=1}^{N} \xi_n = 1$ 。

由定义 1 可知, $p_{u,n}^{w}(t) \in \psi_{u}$, 且存在电网负载 *L*, 有 $L(t) = \sum_{c=1}^{N_{c}} p_{c,n}^{T}(t) + \sum_{u=1}^{N_{U}} p_{u,n}^{w}(t)$ 。设 p^{l} 为为输电功率, 有 $p^{l}(t) = \sum_{c=1}^{N_{c}} \alpha_{c} \cdot p_{c,n}^{T}(t) + \sum_{u=1}^{N_{U}} \alpha_{u} \cdot p_{u,n}^{w}(t) - \sum_{m=1}^{M} \alpha_{m} \cdot L_{m}(t)$, α 为母线至传输线的灵敏值, $L_{m}(t)$ 表示在 *t* 时刻 的 第 *m* 个 电 网 负 载 , $m = 1, 2, \cdots, M$, 且 $-\overline{p}^{l}(t) \leq p^{l}(t) \leq \overline{p}^{l}(t)$ 。

确定发电机组开关机状态转移约束为: $\begin{cases}
x_i^T(t+1) = x_i^T(t) + z_i^T(t), x_i^T(t) \cdot z_i^T(t) > 0 \\
x_i^T(t+1) = z_i^T(t), else
\end{cases}$ $\begin{cases}
z_i^T(t) = 1, 1 \leq x_i^T < \overline{t}_{s,i}^T \\
z_i^T(t) = -1, -\underline{t}_{s,i}^T < x_i^T \leq -1
\end{cases}$

第 31 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 31 No. 10
2019年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2019

 $\overline{t}_{s,i}^{T}, \underline{t}_{s,i}^{T}$ 分别表示机组开关机时间约束。 当 $x_{i}^{T} > 0$ 时, $\underline{p}_{c}^{T} \leq p_{c,n}^{T}(t) \leq \overline{p}_{c}^{T}$, 当 $x_{i}^{T} < 0$ 时, $p_{c,n}^{T}(t) = 0$ 。

1.2 GCPS 系统模型约束条件

可以进一步地定义含有时间特征的、有特殊用途的面向执行器的计算模型。将 GCPS 设计为基于模型化方法、带有不确定参数的 DE(Discrete events)模型。

规约 GCPS 系统约束条件时需要描述一系列 不确定因素,主要包括系统运行时间,传感器数据 质量,传感器配置,电网任务划分网络等。

定义 3 GCPS 系统模型函数为 4 元组, $\psi_G = \langle He, Tk, \text{Re}, Td \rangle$,其中 He 为系统硬件集合, Tk 为任务模型集合, Re 为系统资源调度函数, Td为系统约束条件。

将 1.1 节中的时间变量 $t = 1, 2, \dots, T$ 用超致密 时间函数表示^[14],令时间戳为 $t \Rightarrow t' = (\tau, \ell), \tau$ 为 模型时间,表示执行器输出事件 e 发生的时刻, ℓ 为步长,表示在同一模型时间上事件的执行顺序。

在 ψ_u 中,发电机组能否开机发电,或发电功 率 $\sum_{c=1}^{N_c} p_{c,n}^T(t) + \sum_{u=1}^{N_U} p_{u,n}^w(t)$ 能否满足负载需求,可映射 为执行器输出事件 e 的数据质量 $Q^e(t')$,主要由事 件 e 的价值量 $V(t')^{[15]}$ 与输出事件的执行器 A 的信 息冗余度 χ^A 决定,若执行器 A 执行任务时的信息 熵(不确定性)为 $H(A)^{[16]}$,则有:

$$\begin{cases}
H(A) = -\sum_{\ell_0=0}^{\ell_n} \Pr(e_{\ell_i}) \log_2 \Pr(e_{\ell_i}) \\
\chi^A = 1 - \frac{H(A)}{\log_2 \ell_i} \\
V_\ell(t') = \{(\tau_r + \nu_\tau(t')) - \tau, \tau \leq \tau_r + \nu_\tau(t')\} \\
Q_r^e(t') = \left[1 - \frac{V_\ell(t')}{\overline{\nu_\tau - \underline{\nu}_\tau}}\right] \cdot \left[1 - \frac{H(A)}{\log_2 \ell_i}\right]
\end{cases}$$
(2)

式中: $Pr(e_{\ell_i})$ 为执行器输出序列 $\ell_0, \ell_1, \dots \ell_n$ 中, 某 一事件含有有效价值信息的概率; $V_{\ell}(t')$ 表示在超 致密时间t'下,事件的有效值函数; τ_r 为释放时刻 $v_r(t')$ 为有效时间; v_r 为最差有效时间; v_r 为有效时间; v_r 为有效时间的起始时刻。

系统资源能耗由系统资源调度函数决定: Re = $He \rightarrow Tk$,假设系统在 τ_r 时刻释放事件,等 待 $\omega\tau$ 时间后开始执行系统任务,执行时间为 $\sigma\tau$,则释放事件能耗为 R^{τ_r} 等待时间能耗为 $R^{\omega\tau}$,执行 任务能耗为 $R^{\sigma\tau}$,则R⁴(t')= R^{τ_r} + $R^{\omega\tau}$ + $R^{\sigma\tau}$ 。

定理 1 GCPS 系统约束条件满足实时规则集合 $Td = ((\tau, \ell), Q^e(t'), R^A(t'))$,时序约束条件 $t' = (\tau, \ell)$ 可刻画 $t = 1, 2, \dots, T$ 的时间表达; $Q^e(t')$ 表示执行器 输出事件 e 的数据质量可度量 $p^l(t)$; $R^A(t')$ 为系 统资源能耗的表达可刻画公式(1)。

证明: 已知 $t \Rightarrow t' = (\tau, \ell)$, $(\tau, \ell) \in T$, 故T包 含下降集 $\psi_T(\tau, \ell)$ 或 $\psi_T[\tau, \ell]$, 且 $\tau \in \mathbb{R}$, 故T的下 降集为 $\psi_T(\tau, \infty)$, 则 $\exists t = 1, 2, ..., T$, 使时序约束条 件 $t' = (\tau, \ell) \in N$, 说明超致密时间表达的n个场景 的执行序列为顺序排序的; 系统执行任务时产生的 数据质量 $Q_G(t') = \sum_{\ell_0=0}^{\ell_n} Q_\tau^{e_\ell}(t')$ 由初始事件 e_0 开始按 时间戳t'输入输出执行器,且需要满足约束条件 (2), H(A)表达了不确定发电电源输出功率的不 确定性, χ^A 在执行器内的冗余信息表征电网负载 L的损耗功率, V(t')表达通过电网传输线所输出 的实际价值,故函数 p^l 可由 $Q^e(t')$ 度量; R^{τ_r} , R^{ort} , R^{ort} 分别表达确定发电电源开机启动能耗 $M_c^{S,T}$,发电能耗 M_c^T ,其中 $M_c^{S,T} \Rightarrow R^{\tau_r} + R^{ort}$,故 min $\sum_{n=1}^{N} R_n^A(t') \Rightarrow (1)$ 。

得证。

1.3 系统任务中间件约束调度

可将各不确定性参数通过中间件服务器 (Middleware server)执行数据协同通信与分析进程。如图1所示,中间件模型由PMU的DE模型、 各计算节点与网络连接构成,执行数据事件、消息 事件的聚合、调度工作。 第 31 卷第 10 期 2019 年 10 月 Vol. 31 No. 10 Oct., 2019





PMU以30Hz的采样频率产生实时同步相量, 经过 PMU 数据监视器监测模型函数 ψ_G 内各项数 据,经由 WAMC 估计系统状态变量后,将结果输 入中间件服务器,在输入队列中排序后进入聚合 器,并调解数据得到全局信号收敛控制与约束条 件调整策略,调整结果进入输出队列,输出后由 矫 正 接 收 器 调 整 各 场 景 的 约 束 条 件 集 合 $Td = ((\tau, \ell), Q^e(t'), R^A(t')),$ 最后结合 SCADA 数据 调整 GCPS 函数变量。

2 CA-SADM 模型及框架

CPS 方法极其适用于电力系统模拟动态监测 与数字通信网络,但需要一种统一的建模方法能够 同时囊括连续动态与离散事件形成的网络结构。考 虑针对复杂系统领域、面向执行器的开源嵌入式系 统研究与开发平台 Ptolemy II^[17-18]。

2.1 发电机组可行近似期望目标优化

传统的电网建模若基于 N 个场景则包含无穷 多的情况,若只保证不确定电源可执行任务的下解 可行解,可将 N_U 合并为 H^{N_U}, p^w_{u,h}(t) 表示合并后

的不确定发电电源在
$$t$$
 时刻的发电功率, 其中
 $\sum h = H$, 那么 $L^{H}(t) = \sum_{N_{c}}^{N_{c}} p_{c,n}^{T}(t) + \sum_{h=1}^{H^{N_{U}}} p_{u,h}^{w}(t)$, 对 p^{l}
 $\bar{q} - p^{-l} + \sum_{h=1}^{H^{N_{U}}} \delta_{h} \leq \sum_{c=1}^{c=1} \alpha_{c} \cdot p_{c,n}^{c}(t) + \sum_{h=1}^{L} (\zeta_{1}^{c} \cdot p_{u,h}^{w}(t) + \zeta_{2}) - \sum_{m=1}^{M} \alpha_{m} \cdot L_{m}(t) \leq p^{-1} - \sum_{h=1}^{N^{U}} \delta_{h}$

式中: $\zeta_1 与 \zeta_2$ 为逼近参数, δ_h 为逼近误差,设目标函数为 δ_h ,则有:

$$S_{h} = \min_{\zeta_{1},\zeta_{2}} \left| \max_{\overline{p}_{u,n}^{w}(t) \leq p_{u,n}^{w}(t) \leq \underline{p}_{u,n}^{w}(t), (n \in H^{N_{U}})} \left| \sum_{n \in H^{N_{U}}} (\alpha_{n} \cdot p_{u,n}^{w}(t) - \zeta_{1} \cdot p_{u,n}^{w}(t) - \zeta_{2}) \right| \right]$$

定理 2 通近误差的最优值为:

$$\delta_{h} = \frac{1}{2} \left[\sum_{n=n^{*}+1}^{H^{N_{U}}} (\alpha_{n} - \alpha_{n}^{*}) (p_{u,n}^{w}(t) - \underline{p}_{u,n}^{w}(t)) - \sum_{n=1}^{n^{*}} (\alpha_{n} - \alpha_{n}^{*}) (p_{u,n}^{w}(t) - \underline{p}_{u,n}^{w}(t)) \right]$$

证明: 在场景 $H^{N_{U}}$ 内对 α 进行大小排序,得 到序列 $\alpha_{1}, \alpha_{2}, \dots, \alpha_{n}$, 对 $p_{u,n}^{w}(t)$ 作线性变换,使 $p_{u,n}^{w}(t) - \underline{p}_{u,n}^{w}(t) \in [0, \overline{p}_{u,n}^{w}(t) - \underline{p}_{u,n}^{w}(t)]$, 令 $\overline{p}_{u,n}^{w}(t)$ $-\underline{p}_{u,n}^{w}(t) = \overline{y}_{u,n}$,则可得 ζ_{1} 的最优解 $\zeta_{1}^{*} = \zeta_{u,n^{*}}$,满 足 $\Delta_{j} = \sum_{n=1}^{j-1} \overline{y}_{u,n} - \sum_{n=j}^{H^{N_{U}}} \overline{y}_{u,n}$,且 $\Delta_{u,n^{*}} \leq 0$, $\Delta_{u,n^{*+1}} \geq 0$;

第 31 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 31 No. 10
2019年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2019

同时,得 ζ_2 的最优解 $\zeta_2^* = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{H^{N_U}} (\zeta_{u,n} - \zeta_{u,n^*}) \overline{y}_{u,n}$,故逼近误差 δ_h 的最优值为:

$$\delta_h = \frac{1}{2} \left[\sum_{n=n^*+1}^{H^{N_U}} (\alpha_n - \alpha_n^*) \overline{y}_{u,n} - \sum_{n=1}^{n^*} (\alpha_n - \alpha_n^*) \overline{y}_{u,n} \right]$$

得证。

通过 PILOT 工具求取 δ_h 的最优值,如图 2 所示,其中使用同步数据流域(Synchronous DataFlow, SDF),当执行器执行时,将消耗固定数量的输入数据,且产生固定数量的输出数据。SDF 语义由SDF 控制器实现,灵敏值序列数据 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 由CSVReader 执行器输入,通过 PILOT 工具的CompositeOptimizer 执行器计算得到 δ_h 最优值,在执行器内部实现定理 2 的求解过程。



图 2 通过 PILOT 求解 δ_h 最优值 Fig. 2 Optimal value of δ_h by PILOT

2.2 GCPS 系统协同执行器网络

PMU 的实质是一个事件触发协调器,可对网 络中各场景的运行情况进行分类,连接不同 Scene 执行器,查询其内部状态,统一将网络信息传递给 InfoTransfer。GCPS 电源网络预测模式如图 3 所示, 分析功能能够评估 $\psi_G = < He, Tk, Re, Td >$ 内部条件 与性能阈值,某场景内发电机不符合条件,则视为 故障,可停止运行或采取对应策略,若场景正常运 行则记录模型运行状态,即内部变量,包括对应的 事件与时间 $t' = (r, \ell)$ 。最后将执行进程所产生的事 件统一记录,并将结果反馈回分析功能,为其在下 一阶段的分析任务提供必要数据。



Fig. 3 Prediction mode of Power Network

所建立 GCPS 电源网络, 如图 4 所示, 为了为 相关决策提供依据,执行器需要对 GCPS 全网任务 执行情况进行实时估计,进而实现系统的多目标趋 优控制。要求能够全面地评估 $\psi_G = \langle He, Tk, Re, Td \rangle$ 各个约束指标的实现程度,通过自适应调节,使系 统始终处于最佳状态,此时,GCPS 网络可视为一 个智能广域机器人(Smart Wide Area Robot, Smart-War)^[19]。由图 4 可知, GCPS 电源网络顶层 设计为组合执行器 PowerNetwork, 有 7 个输入端 口,分别为迭代次数,逼近误差 δ_h ,场景 H^{N_U} , 输出文件,停止条件,确定发电电源文件和不确定 发电电源。PowerNetwork 内部使用离散事件语义, GCPSPoissonClock1 触 发 读 由 取 GCPSCSVReader1 内部电源数据并输出至 DeterministicPower, 同理, GCPSPoissonClock2 作 用于 GCPSCSVReader2 且输出于 UncertainPower, GCPSCSVReader1 文件内为确定发电电源数据,而 GCPSCSVReader2 文件内为不确定发电电源。模型 中 H^{N_U} = 30,有8组 PMU,执行 1.3 节所述任务 过程, InfoTransfer 为中间件。

2.3 GCPS 系统模型故障发生模式

在实际工程应用中,系统可能由于环境影响或 其它不确定因素导致故障,此情况分析功能无法提 前预测,为了模拟该情况的发生,模型中增加故障 发生模式,如图5所示。

第31卷第10期	
2019 年 10 月	

张晶,等:基于协同执行器的 GCPS 自适应调度模型

Vol. 31 No. 10 Oct., 2019





图 4 GCPS 电源网络 Fig. 4 GCPS Power Network



图 5 随机故障模型 Fig. 5 Random fault model

第 31 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 31 No. 10
2019年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2019

由 GCPSPoissonClock 执行器产生周期时间, 执行周期为 30,当 CurrentTime 时间大于 30 时, 系统停止运行。在周期内,随机选取某一个场景内 的随机一个电源,使其发生故障,用以检测不确定 性故障发生时系统响应情况。包含故障的电源开关 机状态转移与约束模式如图 6 所示,转移条件如表 1 所示。





表 1 开关机状态转移约束 Tab 1 The constraints of the power switching state transfer

140.1 111000	notatiles of the power switching state transfer
名称	转移条件
Transition1	$z_i^T(t) = 1$
Transition2	$z_i^T(t) = -1$
Transition3	$x_i^T(t+1) = x_i^T(t) + z_i^T(t), x_i^T(t) \cdot z_i^T(t) > 0$
Transition4	SetVariable1 = true
Transition5	SetVariable2 = true
Transition6	true
Transition7	$t' = (\tau, \ell) \neq t$

初始化状态时,若满足发电机组开机条件,则 状态转移至 ON,否则转移至 OFF,若关机状态的 机组随后满足开机条件,则可以启动开机状态;若 变量 SetVariable1 为真,则机组关机,若 SetVariable2 为真,则机组转移至故障状态并且最终将处于关机 状态;若机组始终处于关机状态则考虑发生故障, 使得其无法满足开机约束。

其中, transition1 与 transition2 的转移类型为立即转移(immediate transition),若 init 状态为当前状

态,则立即转移作用与普通转移(ordinary transition) 相同,若 int 状态为目的状态,则状态转移过程将 直接发送两次转移,立即执行 transition1 与 transition2,此外,其它5个转移类型皆为普通转移。

3 模型仿真分析

为研究 GCPS 实时交互行为的唯一性与正确 性,本节基于上述模型研究了4种不同预定策略的 效能,以评估、比较各策略的性能指标。Ptolemy II 平台建立 CA-SADM 模型,仿真环境为1.6GHz 双 核 Intel Core i5 处理器,内存 8.00 GB。

为防止死锁发生,协同执行器只允许单输入 或单输出,当执行器正在处理消息事件或处于故 障状态时,则无法处理新消息。用于仿真分析的 策略如下:

• SPP (Safer Power Policy): 查找最少可开 机的确定发电电源,即开机启动能耗 $M_c^{S,T}$ 与发电 能耗 M_c^T 最低,(不包含无法获取的电源),在模型 中有 min $\sum_{n=1}^{N} R_n^A(t')$,若无法满足条件,则重新规划 无故障电源场景的最低 $\sum_{n=1}^{N} R_n^A(t')$ 的最少确定发电 电源开机数;

• SSP (Shrinking Search Policy): 此策略为一 种多步骤搜索策略,与 SPP 类似,为了寻找最少确 定发电电源开机数,首先搜索所有可开机的电源 场景,使 min $\sum_{n=1}^{N} \mathbf{R}_{n}^{A}(t')$,同时逐步搜寻无故障电源 场景,且按 $x_{1}^{T}, x_{2}^{T}, \dots, x_{n}^{T}$ 顺序开机,直至满足 δ_{h} 的 最优值;

• ORPP (Optimal Runtime Performance Policy): 此策略为满足模型最佳实时交互,在满足 负荷安全的前提下,以最低延迟为首要约束条件, 满足 max $V_{\ell}(t')$;

• OQDP (Optimal Quality of Data Policy): 此策略为满足模型最佳数据质量,在满足负荷安全 的前提下,以最高数据质量为首要约束条件,满足 $\max \sum_{\ell_n=0}^{\ell_n} Q_{\tau}^{e_{\ell}}(t')$ 。 第31卷第10期 2019年10月

CA-SADM 模型中 GCPSCSVReader 执行器输 入数据样本取自 IEEE C37.118 节点,不同预定策 略的性能指标如表 2 所示,其中泊松参数为 GCPSPoissonClock 执行器的内部参数,代表每个 随机故障发生的时间间隔。

	Tab. 2 The performance indicators of different predetermined polices						
策略	泊松	确定性电源	中间件平均通	场景间平均通	确定电源输出	不确定电源输出	总输出功
	参数	开机量/%	信延迟/s	信时间/s	功率/kW	功率/kW	率/kW
SPP	0.5	0.46	15.67	9.97	15 223.82	9 444.17	24 668
	2.0	0.49	6.74	9.21	16 447.50	8 615.49	25 063
	3.5	0.54	2.30	8.31	17 370.54	8 231.46	25 603
SSP	0.5	0.46	16.85	10.37	13 802.36	10 885.63	24 688
	2.0	0.48	5.39	9.26	14 739.83	10 064.17	24 804
	3.5	0.55	2.03	8.93	14 840.75	10 239.24	25 080
ORPP	0.5	0.48	13.41	10.27	13 790.77	9 373.23	24 664
	2.0	0.54	4.36	9.83	16 500.16	8 599.83	25 100
	3.5	0.61	1.98	8.87	17 409.98	8 078.01	25 488
OQDP	0.5	0.46	17.06	10.78	14 922.79	10 066.20	24 989
	2.0	0.55	5.39	9.98	15 742.62	9 587.37	25 330
	3.5	0.64	2.11	8.95	16 663.94	9 223.05	25 887

表2 不同预定策略性能指标

由表2可知, 泊松参数越大, 故障发生的时间 越长,同时故障电源更少,确定性电源开机量随泊 松参数的增大而增加。以泊松参数为0.5分析可知, 使用 ORPP 策略时, 中间件平均通信延迟最低, 使 用 SPP 策略时,场景间平均通信时间最低,使用 SSP 策略时不确定电源输出功率最高,使用 OQDP 策略时,总输出功率最高且确定电源输出功率占比 最低。故协同执行器控制器可在执行点选择最佳调 度策略,若需要降低能耗,同时保证总输出功率不 明显降低,可使用 OQDP 策略,当通信延迟高于 13.41 s 时调整为 ORPP 策略, 当平均通信时间高 于 9.97 s 时调整为 SPP 策略,当故障电源过高时可 调整为 SSP 策略。

将 CA-SADM 模型的总输出功率分为 24 h, 分析每个小时的平均输出功率,如图 7 柱状图所 示,实际数据为蓝色,模型输出数据为红色,仿真 数据的整体趋势与实际情况相仿。对每小时实际数 据与模型数据的输出功率进行准确度比较,如图8 所示,蓝色曲线为模型电源不存在故障时的输出功 率仿真准确度,红色曲线为模型随机产生电源故障 时输出功率仿真准确度。无故障时,电源发电功率 准确度为98.0%~99.0%,随机产生故障时,准确度 为 97.3%~99.0%。



the actual data

研究 CA-SADM 模型电源发生的故障对系统 的影响,设置 30 组实验,在 30 个场景中有 100 个电源,以不同故障数比较系统执行时间与内存使 用率。如图9所示, x 轴为实验组数, y1 轴表示执 行时间(0~90 s)与内存使用率(0%~90%), y2轴表示 故障数(0~9)。可以看出,故障数小于4时,系统

第 31 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 31 No. 10
2019年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2019

内存使用率保持稳定不变,当故障数大于4 且突增 或突减时,由于调整策略的原因,内存使用率相应 变大,若故障数不再突变,则内存使用率逐渐降低 且趋于稳定,若故障数大于8,则内存使用率随着 故障数的增大而增大。同时,当故障数小于4时, 系统执行时间相对稳定,若故障数大于4,则执行 时间随故障数的改变而相应变化。





4 结论

协同自适应控制是智能电网的重要研究方法 之一,电网信息物理系统需考虑信息与物理深度融 合产生的不确定性。本文基于协同执行器的自适应 调度模型,研究不同预定策略的效能,分析模型输 出功率仿真准确度,模拟 CA-SADM 模型电源故 障对系统运行的影响。提出了一种 GCPS 系统模型 约束条件,并用其刻画了电网系统约束条件,通过 信息物理空间的相互联系,在系统约束条件满足实时规则的前提下研究 GCPS 实时交互行为的唯一性与正确性。通过 Ptolemy II 平台的 PILOT 工具求取发电机组可行近似期望目标,仿真验证了所建立的 CA-SADM 模型可在执行点选择更优的调度策略,可较为准确地描述电源输出功率,系统对电源发生故障时有较好的适应能力。

参考文献:

- 何积丰. Cyber-physical Systems[J]. 中国计算机学会 通讯, 2010, 6(1): 25-29.
 He Jifeng. Cyber-physical Systems[J]. Communications of CCF, 2010, 6(1): 25-29.
- [2] Palensky P, Widl E, Elsheikh A. Simulating cyber-physical energy systems: challenges, tools and methods[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetcs: Systems (S2168-2216), 2014, 44(3): 318-326.
- [3] Gao Y, Gao F, Zhai Q, et al. Self-Balancing Dynamic Scheduling of Electrical Energy for Energy-intensive Enterprises[J]. International Journal of Sytems Sciences (S0020-7721), 2013, 44(6): 1006-1025.
- [4] 李仁发,谢勇,李蕊,等.信息-物理融合系统若干关 键问题综述[J].计算机研究与发展,2012,49(6): 1149-1161.

Li Renfa, Xie Yong, Li Rui, et al. Survey of cyber-physical systems[J]. Journal of Computer Research Development, 2012, 49(6): 1149-1161.

- [5] Susuki Y, Koo T J, Ebina H, et al. A Hybrid System Approach to the Analysis and Design of Power Grid Dynamic Performance[J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2012, 100(1): 225-239.
- [6] Ilic M D, Xie L, Khan U A, et al. Modeling of future cyber physical energy systems for distributed sensing and control[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans (S1083-4427), 2010, 40(7): 825-838.
- [7] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌, 等. 电力系统信息物理融 合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国 电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489.
 Guo Qinglai, Xin Shujun, Sun Hongbin, et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [8] 王冰玉, 孙秋野, 马大中, 等. 能源互联网多时间尺 度的信息物理融合模型[J]. 电力系统自动化, 2016,

40(17): 13-21.

Wang Bingyu, Sun Qiuye, Ma Dazhong, et al. A cyber physical model of the energy internet based on multiple time scales[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 13-21.

[9] 韩宇奇,郭创新,朱炳铨,等.基于改进渗流理论的 信息物理融合电力系统连锁故障模型[J].电力系统自 动化,2016,40(17):30-37.

Han Yuqi, Guo Chuangxin, Zhu Bingquan, et al. Model cascading failures in cyber physical power system based on improved percolation theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 30-37.

- [10] Kundur D, Feng X, Mashayekh S, et al. Towards modelling the impact of cyber-attacks on a smart grid[J]. International Journal of Security & Networks, 2011, 6(1): 2-13.
- [11] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8.
 Zhao Junhua, Wen Fusuan, Xue Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [12] Alur R, Dill D L. A theory of timed automata[J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126(2): 183-235.
- [13] Tong B, Zhai Q, Guan X. An MILP Based Formulation for Short-Term Hydro Generation Scheduling With Analysis of the Linearization Effects on Solution Feasibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 2013, 28(4): 3588-3599.
- [14] Sarjoughian H S, Sundaramoorthi S. Superdense time trajectories for DEVS simulation models[C]. Symposium on Theory of Modeling & Simulation: Devs

Integrative M&S Symposium. Society for Computer Simulation International. Alexandria, VA, USA. 2015: 249-256.

- [15] 张晶,陈垚,范洪博,等.信息物理融合系统任务调度权限控制策略[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 60-66.
 Zhang Jing, Chen Yao, Fan Hongbo, et al. Control Strategy of Task Scheduling Permission in Cyber-physical System[J]. Computer Engineering, 2017, 43(4): 60-66.
- [16] 张晶,陈垚,范洪博,等.基于信息物理融合系统执行器输出事件的价值评价调度策略[J]. 计算机应用,2017,37(6):1663-1669.
 Zhang Jing, Chen Yao, Fan Hongbo, et al. Scheduling strategy of value evaluation for output-event of actor based on cyber-physical system[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(6): 1663-1669.
- [17] Akkaya I, Liu Y, Lee E A. Modeling and Simulation of Network Aspects for Distributed Cyber-Physical Energy Systems[M]. Cyber Physical Systems Approach to Smart Electric Power Grid. Springer Berlin Heidelberg, 2015: 1-23.
- [18] 徐洪智,李仁发,曾理宁. 基于 Ptolemy 的信息物理融 合系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8): 1633-1638.
 Xu Hongzhi, Li Renfa, Zeng Lining. Modeling and simulation of cyber-physical system based on Ptolemy[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8):
- [19] 卢强, 威晓耀, 何光字. 智能电网与智能广域机器人
 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 1-5.
 Lu Qiang, Qi Xiaoyao, He Guangyu. Smart Grid and Smart Wide Area Robot[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 1-5.

1633-1638.