基于 MAS 和 Petri-net 技术的新能源电网协调控制策略

朱 涛[1]，梁 铃[1]，宋振涛[2]，程广清[2]

(1.云南电力调度控制中心，云南 昆明 650041；2.易能(中国)电力科技有限公司，北京 100093)

摘要：为提高新能源微电网电力供应的安全性和经济性，提出了一种基于 Multi-Agent 和 Petri-net 技术的协调控制策略。微电网是一个典型的混合系统，包括多种分布式发电和储能单元，它们具有不同行为特征和多种运行模态。考虑到这些分布式单元模态运行和逻辑切换的复杂性，构建了 Multi-Agent 系统(MAS)，通过多 Agent 的交互作用来实现分布式协调控制策略。由于 Petri-net 模型是表述多模态运行系统的最有效工具之一，所以采用 petr-net 模型来描述各分布式单元的模态切换行为并以此设计其单元 Agent 模态切换控制策略。在此基础上，基于 Multi-Agent 系统框架在上层中心 Agent 中构建各分布式能源单元之间的模态协调切换控制策略，来实现整个微电网运行模态的有效切换。最后仿真验证了所提出的控制策略的有效性。

关键词：微电网；Multi-Agent 系统；协调控制策略；分布式能源；多模态行为；Petri-net

MAS based coordination control strategies for micro-grid by using Petri-net

ZHU Tao[1], LIANG Ling[1], SONG Zhentao[2], CHENG Guangqing[2]

(1. Yunnan Electric Power Dispatching Control Center, Kunming 650041, China; 2. YINENG (CHINA) Power Technology Co., Ltd., Beijing 100093, China)

Abstract: This paper proposes a coordinated control strategy based on Multi-Agent and Petri-net technology to improve the security and economy of the new energy micro-grid's electricity supply. The micro-grid is a typical hybrid system that includes many sorts of distributed energy resource units with different behavioral characteristics and multiple operational modes. Considering the complexity behind multi-mode behaviors, a Multi-Agent System is firstly constructed to implement distributed coordinated control strategy. Then, by using Petri net model, the multi-mode switching behaviors of the distributed energy resource units are described and the control strategies of their unit Agents are designed respectively. It is because that Petri net is one of the most useful tools for modeling the multi-mode system. On this basis, the coordinated control strategies are designed based on the Multi-Agent System platform. The effectiveness of the proposed control is demonstrated through simulation examples.

Key words: micro-grid; Multi-Agent System; coordinated control strategy; distributed energy resources; multi-mode behavior; Petri-net

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)12-0001-07

0 引言

随着全球能源和环境问题的日益严峻，新能源和可再生能源的开发和利用也日益引起关注[1-3]。然而，由于可再生能源具有不确定性和随机性，所以单一的可再生能源很难保证对负荷进行连续可靠的电力供应[4-6]。为了充分发挥新能源和可再生能源的优势，减小其负面影响，在可再生能源发电领域诞生了微电网的概念[7-8]。微电网通常是由小容量的多种微电源，多种储能装置以及一组负荷汇集而成的低压输配电系统，具有并网和孤岛两种工作模式[9-11]。在并网模式下，微电网可以作为负荷从大电网索取电能，也可以作为电源向大电网输送电能。微电网系统的功率平衡主要有大电网来承担。当有异常情况发生时，微电网将与大电网断开，运行在孤岛模式下。此时的微电网必须有足够的功率调节能力来维护系统的电压和频率。因此，建立一个行之有效的控制策略能够很大程度地提高微电源的功率调节能力，对维护微电网的安全稳定至关重要。

微电网包含多种分布式发电和储能单元，它们具有不同行为特征和多种运行模态。特别是可再生能源发电单元，例如光伏发电和风能发电单元，其

运行模态(MPPT、恒功率和停止运行)取决于风速和阳光辐射等自然条件，故输出功率也具有不可预测性和不稳定性。而这些可再生能源的模态切换往往伴随着储能装置的充放电模式转换，这些分布式能源模态切换之间的逻辑关系非常复杂。可以断定的是，如果能合理地协调各分布式能源单元的模态切换，微电网的功率调节能力会很大程度的提高，负荷供电的可靠性和经济效益也会得到有效改善。

考虑微电网组成结构和行为特性的复杂性，为了对其有效控制，基于 Multi-Agent 的分布式协调控制策略应该是最佳选择[12-14]。Multi-Agent 系统(MAS)是多个 Agents 彼此依赖组成的一个共同体，他们之间通过合作或竞争，实现个体和整个系统的目标。基于 MAS 的分布式协调控制策略具有以下理想特性[15]。

1) 自主权：在 MAS 中，每个 Agent 在合作或竞争的环境下，独立自主地以异步和并行方式来控制自己的分布式单元。因此，这种控制策略能够确保复杂微电网分布式协调控制的可行性和高效率。

2) 适应性：由 Multi-Agent 在相互合作和相互依赖地面对变化和不确定的运行环境。因此，基于 MAS 的控制策略对不确定的运行环境具有较强的适应性。

3) 可靠性：如果其中一个 Agent 发生故障时，其他 Agent 可以自适应地调整自己而保证整个系统继续运行。

4) 减少了数据处理：在 MAS 中，信息应在各 Agent 本地处理，各 Agent 之间应交换知识信息。

5) 多模态有效协调：在 MAS 中，各 Agent 可以自主地切换和控制其运行模态，也可以通过 Agent 之间的信息交互来协调切换它们运行模态。因此，在基于 MAS 的控制策略能保障多模态协调切换的可行性和有效性。

鉴于上述原因，本文提出了基于 MAS 的分布式协调控制策略，其目的是为了协调切换分布式能源单元的运行模态，以提高微电网供电的安全可靠性和经济性能。该研究首先构建了 MAS，设计了两层 Agent 分布式协调控制方案；考虑 Petri-net 模型是表述多模态运行系统的最有效工具之一，故采用 Petri-net 模型描述各分布式能源单元进行多模态切换行为，并设计其单元 Agent 的模态切换控制策略。在此基础上，在上层中心 Agent 中构建各分布式能源单元之间的协调切换控制策略，来实现整个微电网运行模态的有效切换，进而提高其能源供应的安全性和经济性。最后仿真结果证明了所提出的控制策略的有效性。

1 基于 MAS 的分布式协调控制方案

本文以图 1 所示的微电网为例进行研究，该系统包含四个分布式能源单元和一个负载单元。四个分布式能源单元分别是存储单元，微涡(MT)与燃料电池(FC)组合发电单元，风力涡轮机(WT)发电单元和光伏(PV)电池发电单元。负载单元是由非敏感和灵敏负荷组成。对应于该微电网，基于 MAS 的分布式协调控制被设计，它包括一个高层中心 Agent 和多个低层单元 Agent。

下级单元 Agent 负责各单元的分布控制，即各分布式单元 Agent 负责切换其单元系统的运行模态以调节各单元功率输出和维护其安全运行。上级中心 Agent 负责协调所有单元 Agent 模态切换，进而保证整个系统能源供应的安全性和经济性。两层 Agent 通过信息交互来实现其分布式协调控制策略。

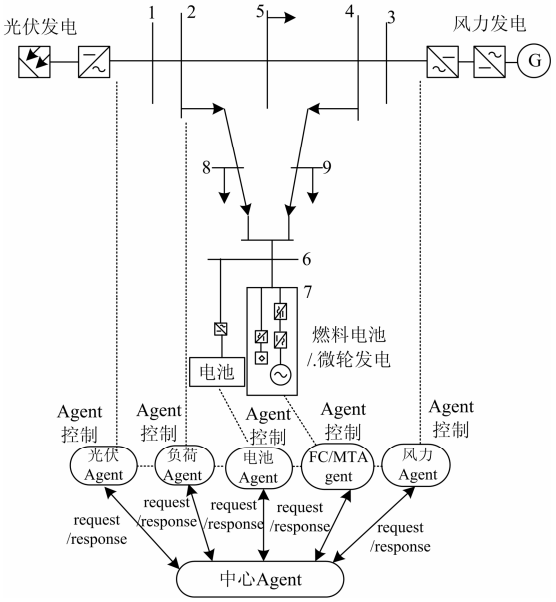


图 1 基于 MAS 的微电网分布式协调控制方案

Fig. 1 MAS based distributed coordinated control scheme

2 分布式能源单元的 Petri-net 模型以及单 Agent 模态切换控制策略

1) 可再生能源单元控制策略

(1) PV 和 WT 输出功率

PV 单元输出功率可以用下面公式计算。

$$P_{\mathrm{PV}}=\begin{cases}P_{\mathrm{stc}}\dfrac{G_{\mathrm{ing}}}{G_{\mathrm{stc}}}\left(1+k\left(T_{\mathrm{c}}-T_{\mathrm{r}}\right)\right) & G_{\mathrm{ing}}>C\\ 0 & G_{\mathrm{ing}}<C\end{cases} \tag{1}$$

式中：P_{PV} 为光照 G_{ing} 时的输出功率；P_{stc} 为标准条

件下的最大功率；G_{ing} 为入射辐射度，为 1000 W/m；k 为标准辐照度下温度系数；T_c 是列阵温度；T_r 是参考温度 25 ℃。

WT 单元输出功率可以用下面公式计算：

$$P_{WT}=\begin{cases}0 & V<V_{in}\\ a+bV+CV^2 & V_{in}\le V<V_R\\ P_R & V_R\le V\le V_{out}\\ 0 & V>V_{out}\end{cases} \tag{2}$$

式中：P_{WT} 为输出功率；V 为风的速度；P_R 为 WT 的额定功率；V_{in} 为切入风速；V_R 为额定转速；V_{out} 为切出速度。系数 a、b 和 c 可以通过求解以下线性方程计算。

$$a+bV_{in}+cV_{in}^2=0 \tag{3}$$

$$a+bV_R+cV_R^2=P_R \tag{4}$$

$$a+bV_c+cV_c^2=P_R\frac{(V_c)^3}{(V_R)^3} \tag{5}$$

$$V_c=\frac{V_{in}+V_{out}}{2} \tag{6}$$

(2) PV 和 WT 的 Petri-net 模型及单元 Agent 模态切换控制策略

作为可再生的能源，PV 或 WT 单元的输出功率和运行模态很大程度上依赖于自然条[16-17]。为了最大限度地提高经济效益，PV 或 WT 发电单元通常运行在 MPPT 模式。只有当电压高于 1.05 的最大安全电压，PV 或 WT 单元必须切换到 VL 模式。根据上述计算的功率输出和本身的电压条件，PV 或 WT Agent 的运行模态控制策略被设计成如图 2 所示。对应于图 2 的库所和变迁表述于表 1。

表 1 PV/WT Agent 库所和变迁描述

Table 1 Places and transitions of PV/WT agent

库所/变迁	描述
p1	PV/WT Agent 在切换前状态
p2	PV/WT Agent 处于就绪状态
p3	PV/WT Agent 处于判断命令状态
p4	PV/WT Agent 处于判断电压状态
p5	PV/WT Agent 在 MPPT 运行模态
p6	PV/ WT Agent 在 VL 运行模态
t1	初始事件
t2	PV / WT Agent 接收控制命令
t3	PV / WT Agent 不接收控制命令
t4	发送控制命令到 PV /WT Agent 以切换到 MPPT 模态
t5	发送控制命令到 PV / WT Agent 以切换到 VL 模态
t6	PV/WT Agent 检测到的电压低于 1.05 最大安全电压
t7	PV/WT Agent 检测到的电压不小于 1.05 最大安全电压
t8	PV / WT Agent 在 MPPT 模态运行
t9	PV / WT Agent 在 VL 的模态运行

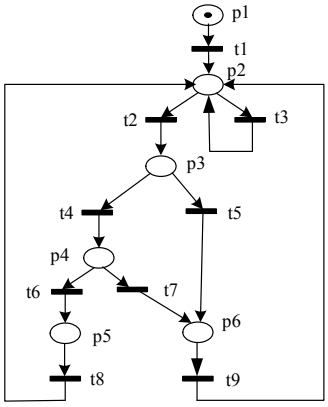


图 2 基于 Petri-net 模型的 PV/WT Agent 模态控制策略

Fig. 2 Petri-net based mode control strategies of PV/WT Agent

2) 能量存储单元控制策略

(1) 能量存储容量

蓄电池电压为

$$V_B=V_g+i_{bat}(t)R_g \tag{7}$$

式中：V_g 表示在电池端子间开路电压；R_g 为电阻；V_B 为电池电压；i_{bat} 为电池电流。充电电池容量可按下式计算：

$$SOC_B(t)=SOC(t_0)+\frac{1}{C}\int_{t_0}^{t}i_{bat}(t)\mathrm{d}t \tag{8}$$

其中，C 是电容。

(2) 蓄电池的 Petri-net 模型及单元 Agent 模态切换控制策略

蓄电池 Agent 依照上述计算的 SOC 条件和本身的电压来确定电池是否需要充电或放电。蓄电池 Agent 运行模态控制策略被设计成图 3 所示。对应于图 3 的库所和变迁表述于表 2。

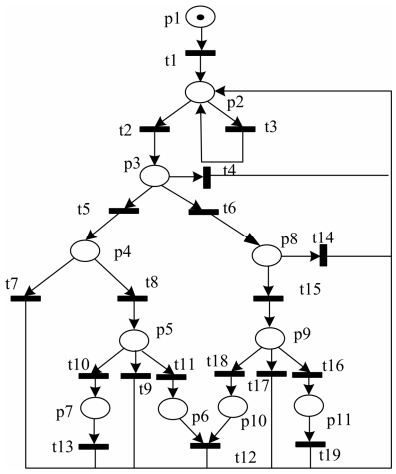


图 3 基于 Petri-net 的蓄电池 Agent 运行模式控制策略

Fig. 3 Petri-net based mode control strategies of battery Agent

表 2 蓄电池 Agent 库所和变迁描述

Table 2 Places and transitions of battery Agent

库所/变迁	描述
p1	蓄电池 Agent 是在切换前状态
p2	蓄电池 Agent 处于就绪状态
p3	蓄电池 Agent 处于判断命令的状态
p4	蓄电池 Agent 判断电池是否已充电满
p5	蓄电池 Agent 判断 1.电池是否在安全工作范围 2.电池是否大于 0.95 的最低安全电压
p6	蓄电池 Agent 接收控制命令而停止运行
p7	蓄电池 Agent 接收控制命令切换到充电模态
p8	蓄电池 Agent 判定该电池的充电是否为满
p9	蓄电池 Agent 判断 1.是否 SOC 小于或等于其安全范围 2.电池是否小于 1.05 的最大安全电压
p10	蓄电池 Agent 接收控制命令而停止运行
p11	蓄电池 Agent 接收控制命令切换到放电模态
t1	初始事件
t2	蓄电池 Agent 接收控制命令
t3	蓄电池 Agent 不接收控制命令
t4	蓄电池 Agent 接收控制命令以保持目前的状态
t5	蓄电池 Agent 接收充电控制命令
t6	蓄电池 Agent 接收放电控制命令
t7	蓄电池 Agent 响应充满电
t8	蓄电池 Agent 响应还没有充满电
t9	蓄电池 Agent 响应 1.是，2.否
t10	蓄电池 Agent 响应 1.是，2.是
t11	蓄电池 Agent 响应 1.是，2.否
t12	蓄电池 Agent 停止运行
t13	蓄电池 Agent 充电
t14	蓄电池 Agent 响应其 SOC 为 0
t15	蓄电池 Agent 响应其 SOC 不为 0
t16	蓄电池 Agent 响应 1.是，2.否
t17	蓄电池 Agent 响应 1.是，2.是
t18	蓄电池 Agent 响应 1.是，2.否
t19	蓄电池 Agent 放电

3) FC&MT 单元控制策略

当 PV 和 WT 能满足负载需求时，FC&MT 单元通常工作在低输出模式。只有当 PV 和 WT 不能满足负荷需求，FC&MT 单元则需要增加功率输出。基于 Petri-net 的 FC&MT Agent 运行模态控制策略被设计如图 4 所示。对应于图 4 的库所和变迁表述于表 3。

4) 负载单元控制策略

负载单元 Agent 负责负载管理，基于 Petri-net 负载 Agent 运行模式控制策略如图 4 所示。对应的库所和变迁描述于表 4。

表 3 FC&MT Agent 库所和变迁的描述

Table 3 Places and transitions of FC/MT Agent

库所/变迁	描述
p1	MT/FC Agent 在转换前的状态
p2	MT/FC Agent 处于就绪状态
p3	MT/FC Agent 处于判断命令的状态
p4	MT/FC Agent 处于准备就绪，判断电压的状态
p5	MT/FC Agent 处于准备就绪提高输出模态
p6	MT/FC Agent 处于准备就绪减少输出模态
t1	初始事件
t2	MT/FC Agent 接收控制命令
t3	MT/FC Agent 不接收控制命令
t4	MT/FC Agent 发送控制命令以维持现有模态
t5	MT/FC Agent 发送控制命令减小输出功率
t6	MT/FC Agent 发送控制命令增加输出功率
t7	MT/FC Agent 检测到电压不大于 0.95 的最低安全电压
t8	MT/FC Agent 检测到的电压低于 0.95 的最低安全电压
t9	MT/FC Agent 切换到减小输出模态
t10	MT/FC Agent 检测到电压不大于 1.05 的最大安全电压
t11	MT/FC Agent 检测到的电压低于 1.05 的最大安全电压
t12	MT/FC Agent 切换到增加输出模态

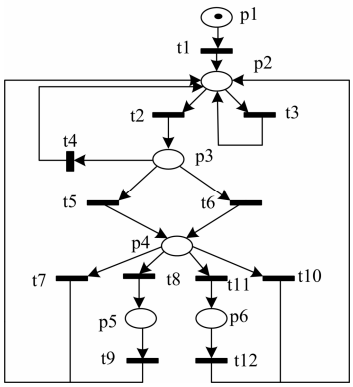


图 4 基于 Petri-net 的 FC/MT Agent 的运行模式控制策略

Fig. 4 Petri-net based mode control strategies of FC/MT Agent

表 4 负载 Agent 库所和变迁描述

Table 4 Places and transitions of load Agent

库所/变迁	描述
p1	负载 Agent 切换前状态
p2	负载 Agent 就绪状态
p3	负载 Agent 处于判断命令状态
p4	负载 Agent 处于准备就绪以判断电压状态
p5	负载 Agent 处于准备就绪减少负载状态
p6	负载 Agent 处于准备就绪恢复负荷状态
t1	初始事件
t2	负载 Agent 接受控制命令
t3	负载 Agent 不接受控制命令
t4	负载代理接到命令以保持当前模式
t5	负载 Agent 接到控制命令以减小负载
t6	负载 Agent 接到控制命令恢复负载
t7	负载 Agent 检测到电压大于 0.95 的最低安全电压
t8	负载 Agent 监测到电压不大于 0.95 的最低安全电压
t9	负载 Agent 决定甩负荷
t10	负载 Agent 检测到电压不大于 1.05 的最大安全电压
t11	负载 Agent 检测到电压大于 1.05 的最大安全电压
t12	负载 Agent 决定恢复负荷

3　基于 Petri-net 上层 Agent 协调控制策略

单元 Agent 模态切换过程不仅取决于本单元的事件驱动的离散行为，而且还与其他代理的交互行为有关。如存储单元 Agent 通常与其他 Agent 进行互动来确定其是否需要切换到充电或者放电模态。当一个单元 Agent 需要通过交互行为来确定其运行模态时，它可以向上级中心 Agent 发送请求。如果上层中心代理通过控制命令进行回应，其运行模态即可切换。上层中心 Agent 制定的协调控制策略如图 5 所示。对应的库所和变迁描述列于表 5。

表 5 库所和变迁的描述

Table 5 Places and transitions of center Agent

库所/变迁	描述
p1	中心 Agent 在状态切换前状态
p2	中心 Agent 判断 1. PV 是否在 MPPT 模态, 2. WT 是否在 MPPT 模太
p3	中心 Agent 判断 1. PV 或 WT 单元 Agent 电压状态, 2. MT/FC 单元 Agent 运行条件
p4	FC/MT Agent 处在判断运行模式状态
p5	中心 Agent 处在判断电池是否充满状态
p6	蓄电池和 PV 单元 Agent 准备就绪切换到运行模态
p7	蓄电池 Agent 处于准备充电状态
p8	中心 Agent 处在判断电池是否充满状态
p9	中心处在判断电池是否耗尽状态
p10	FC/MT Agent 处在运行模态切换状态
p11	蓄电池 Agent 处在准备充电状态
p12	中心 Agent 处在判断 FC/MT 是否在最大输出状态
p13	蓄电池 Agent 处在模态切换准备就绪状态
p14	命令发送到负载 Agent
p15	发出增加 FC/MT 输出的命令
p16	中心 Agent 判断电压是否超出安全范围
p17	WT Agent 运行在 VL 模态
t1	初始事件
t2	PV 和 WT Agent 响应 是
t3	PV 和 WT Agent 响应 否
t4	FC/MT Agent 响应其处于 VL 模态
t5	蓄电池 Agent 充电
t6	PV 或 WT Agent 响应电压升高，FC/MT Agent 切换到 VL 模态
t7	PV 或 WT Agent 响应该电压低于正常电压
t8	PV 或 WT Agent 响应电压升高，FC/MT Agent 响应未运行在 LV 模态
t9	蓄电池 Agent 响应 否
t10	蓄电池 Agent 响应 是
t11	FC/MT Agent 减少输出
t12	FC/MT Agent 响应 是
t13	FC/MT Agent 响应 否
t14	负载 Agent 甩负荷
t15	FC/MT Agent 增加输出
t16	蓄电池 Agent 继续放电
t17	FC/MT Agent 响应其不在 VL 模态
t18	电池 Agent 停止充电，PV 切换到 VL 运行模态
t19	中心 Agent 响应 是
t20	中心 Agent 响应 否
t21	WT Agent 切换到 VL 运行模态

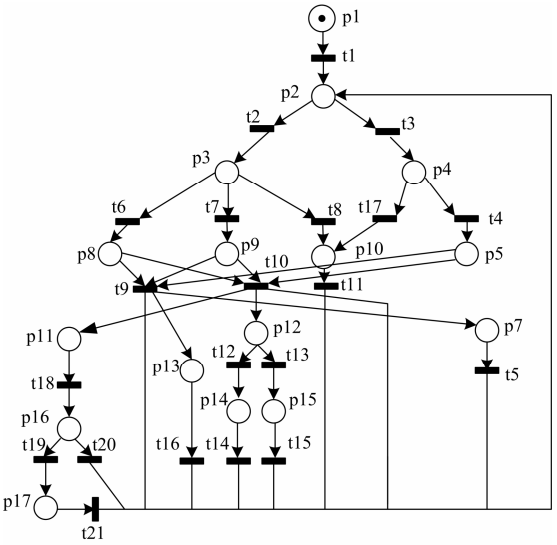
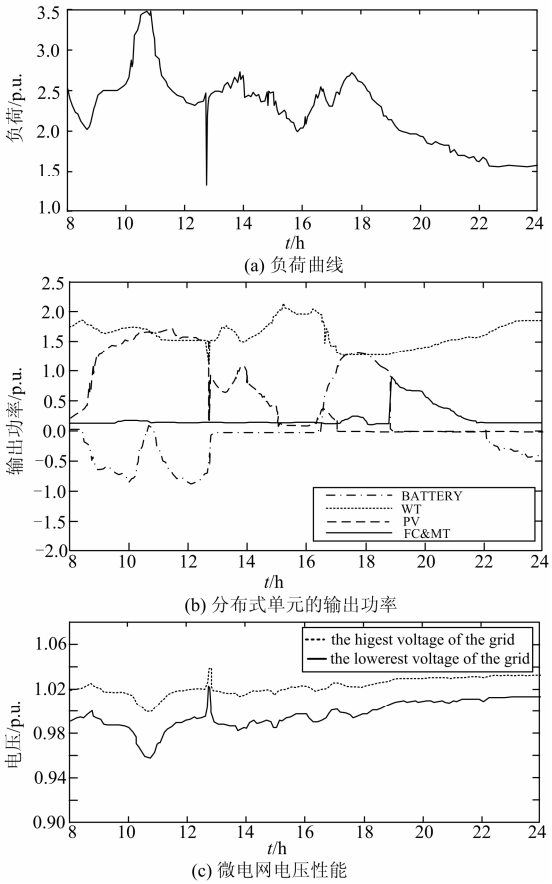


图 5 基于 Petri-net 的中心 Agent 的协调切换控制策略

Fig. 5 Petri-net based mode control strategies of center Agent

4　仿真研究

图 6(a)为负荷曲线，在给该负载供电的情况下，研究微电网基于 MAS 的协调控制策略的供电性能，以此来验证该策略的有效性。图 6(b)给出了该策略下各分布式单元的输出功率。从图 6(b)可以看出，在大部分的时间内，负载超过了可再生能源发电，PV 和 WT 单元 Agent 运行在 MPPT 模态。当 t=12.75 h，瞬时故障导致 50%左右的甩负荷。这时，可再生能源发电超过负荷，PV 和 WT 单元 Agent 转换到 LV 运行模式。此外，从 15:15 h 到 16:20 h，可再生能源发电一直超出负载，PV 单元仍保持在 LV 模态，但 WT 单元切换到 MPPT 模态。此外，17 h 至 24 h 的时间内，由于没有光照，PV Agent 停止工作。对于蓄电池 Agent，除了停止运转模式外，它频繁切换于放电和充电模态之间以匹配不平衡的功率。而在大部分时间中，FC/MT 单元 Agent 运行在低输出模式，以尽可能减少运行成本。图 6(c)给出了 MG 的电压性能。可以看出，在所有的仿真时间中，该电压控制在 0.95 p.u.和 1.05 p.u.之间，即使是在 50 % 甩负荷时刻，波动值也没有超出±5 %的安全范围。所有上述结果表明，所提出基于 MAS 的协调控制策略能够保证微电网电力供应具有较高的安全性和经济性。



(a) 负荷曲线

(b) 分布式单元的输出功率

(c) 微电网电压性能

图 6 基于 MAS 协调切换控制策略下的微电网性能

Fig. 6 Performance under the MAS based coordinated switching control

5 结论

为了提高微电网能源供应的安全性和经济性，本文提出了基于 MAS 的协调控制策略。该研究具有以下创新性内容：1) 设计了一个 MAS 并构建分散协调控制策略；2) 基于 Petri-net 模型设计了各单元 Agent 的切换控制策略；3) 设计了上层中心协调 Agent 的协调切换控制策略。仿真结果表明：该方案可以有效和灵活切换微电网的运行模态，进而大大提高电力供应的安全性和经济性。随着可再生能源的不断开发和利用，该方案有望拓展应该到其他分布式发电系统，故具有很强的应用前景。

参考文献

[1] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.

[2] 唐志军, 邹贵彬, 高厚磊, 等. 含分布式电源的智能配电网保护控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 10-14.
TANG Zhijun, ZOU Guibin, GAO Houlei, et al. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 10-14.

[3] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on effects of volt/var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.

[4] 陈达威, 朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 117-122.
CHEN Dawei, ZHU Guiping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 117-122.

[5] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[6] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.

[7] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.

[8] 霍群海, 李宁宁. 微电网中微源逆变器带混合负载控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 270-277.
HUO Qunhai, LI Ningning. Research on control strategy of micro-source inverter with mixed load in micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 270-277.

[9] BENJAMIN K, ROBERT L, TOSHIFUMI I, et al. A look at microgrid technologies and testing, projects from around the world [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008: 41-53.

[10] LASSETER B. Microgrid, istributed power generation[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 1: 146-149.

[11] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
ZHENG Zhanghua, AI Qian. Present situation of research on micogrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31.

[12] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, KHAMBADKONE A M. Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(1): 138-148.

[13] 赵龙文, 侯义斌. Agent 的概念模型及其应用技术[J]. 计算机工程与科学, 2000, 22(6): 75-79.
ZHAO Longwen, HOU Yibin. The concept model and application technology of Agent[J]. Computer Engineering and Science, 2000, 22(6): 75-79.

[14] 陈璨华, 陈少华, 杨宜民, 等. 多 Agent 技术在母线保护系统中应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 59-62.
CHEN Canhua, CHEN Shaohua, YANG Yimin, et al. Application of multi agent technology in bus protection relay system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 59-62.

[15] ZHOU Ming, REN Jianwen, LI Gengyin, et al. A multi-Agent based dispatching operation instructing system in electric power systems[C] // Power Engineering Society General, 2003, 1: 436-440.

[16] 艾芊, 吴俊宏, 章健. 智能电网中清洁分布式能源的优化利用策略[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2813-2819.
AI Qian, WU Junhong, ZHANG Jian. Strategies for optimal use of clean distributed energy in grid[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2813-2819.

[17] 郭佳欢, 谢清华, 黄伟. 基于 MAS 的微电网即插即用理论研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 31-35.
GUO Jiahuan, XIE Qinghua, HUANG Wei. Study on the plug and play theory in micro-grid based on MAS[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(1): 31-35.

收稿日期：2014-09-08；　修回日期：2014-10-21

作者简介：

朱　涛(1978-)，男，硕士，高级工程师，研究方向为电力系统运行分析、调度自动化技术等；E-mial: zhutao@yn.csg.cn

梁　铃(1988-)，女，硕士，助理工程师，研究方向为调度自动化系统；

宋振涛(1983-)，男，硕士，工程师，研究方向为智能电网技术、调度智能化等。

(编辑 张爱琴)