

基于智能多代理的能量协调控制在直流微网中的应用

王晶¹,李瑞环¹,束洪春²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310014;2. 昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650051)

摘要:提出一种基于智能多代理技术的能量协调控制方法,用于直流微网的能量管理与电压控制。对直流微网的架构进行设计,实现对光伏电池、燃料电池及蓄电池的数学建模。设计了一个2层的智能多代理系统,对直流微网的并网、解列,以及光伏电池、燃料电池、负荷及蓄电池的能量管理进行协调控制。从微源和负荷各种状态中提取了8个特征量及13种不同动作作为神经网络的输入和输出参数,训练并实现了控制中心Agent的决策器。通过MATLAB/Simulink仿真对光照变化、并网时负荷增加后断网及孤岛时负荷增加后并网这3种算例进行分析,验证了该智能多代理能量协调控制策略的可行性。

关键词:多代理系统;直流微网;神经网络;能量管理;协调控制;电压控制

中图分类号: TM 731

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.023

0 引言

近年来,微网(microgrid)成为研究热点。但微网存在微源布址分散、控制信息多样、控制方式多变等特点,使得交流微网与主网并网、孤岛及无缝切换的实现需要解决分布式电源的复杂控制,并受频率、相位的约束;此外,交流微网还存在线路损耗较大等问题^[1]。相反,直流微网在各种运行模式下,不存在与主网同步的问题,大幅降低了控制要求,而且能节约电力电子器件,减少线路损耗及系统成本,并能更好地利用具有直流特性的分布式电源^[1-2]。因此,直流微网逐渐受到重视。2007年美国弗吉尼亚理工大学提出了SBI(Sustainable Building Initiative)计划,准备向未来楼宇直流供电^[3];2011年韩国建立了直流微网供电系统,将对直流电分配等问题进行研究^[4];2013年日本SAKURA Internet公司正式在数据中心启动了采用直流供电系统的服务器机柜,估算每年能削减电费2700万日元^[5];欧洲的超级智能电网计划也提出了以直流输电网为骨干的输电模式,并预期在2020年左右将北海地区的风电场以直流形式并网^[6]。

目前,关于直流微网的理论研究主要集中在保护^[7-9]、电力电子接口电路^[10-12]、能量管理与电压控制^[13-16]等方面。其中,文献^[13]提出了一种通过控制热电联产系统运行数量的方法,保证功率平衡,维持电压稳定;文献^[14]通过光伏阵列控制器、燃料电池控制器、超级电容控制器及中央控制器的合作稳定了直流母线电压;文献^[15]提出微网的3种

运行状态,并设计了相应的控制策略,使微网达到功率平衡;文献^[16]提出了电压分层协调控制策略,根据电压的变化量采用不同的控制策略,以保证功率平衡。

多代理系统MAS(Multi Agent System)具有良好的自主性和启发性,适合微网分散而复杂的控制。文献^[17]建立了由微网控制代理、局部控制代理、分布式能源代理及负荷代理构成的多代理系统,能够快速高效地恢复微网频率;文献^[18]在提出的多代理系统中设计了公共通信接口实现Agent之间的通信,完成微网的能量控制;文献^[19]构建的多代理系统由分布式电源层、微网层及配网层组成,能够通过实现并网运行、孤岛运行、并网操作等5种情况下的控制策略对微网进行管理。

本文针对直流微网提出了一种2层的多代理控制系统,其中上层为控制中心Agent,下层包括光伏电池Agent、燃料电池Agent、负荷Agent及蓄电池Agent;之后,训练了一个8输入8输出的神经网络作为控制中心Agent的决策器,该神经网络能输出13种控制命令实现对微网的管理;最后,通过MATLAB对光照变化、并网时负荷增加后断网及孤岛时负荷增加后并网这3种算例进行仿真,仿真结果表明该控制系统能够实现微源和负荷的协调控制,并维持直流母线电压的稳定。

1 直流微网模型

本文构建的直流微网结构如图1所示,由光伏电池、燃料电池、蓄电池、直流负荷和交流负荷组成,通过DC/AC逆变器与电网相连,可并网运行,也可孤岛运行。直流母线电压额定值设定为350V^[20]。负荷按重要程度分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。其中,一级负荷不可间断供电,二级负荷可以短时间断电,三级负荷可以长时间断电。

收稿日期:2013-04-10;修回日期:2013-05-31

基金项目:国家自然科学基金主任基金项目(51147010);国家自然科学基金青年基金项目(51207139)

Project supported by China Natural Science Foundation Director Fund(51147010) and China Natural Science Foundation for Young Scholars(51207139)

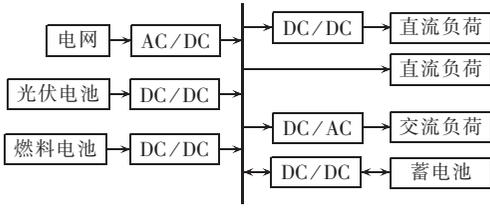


图 1 直流微网结构

Fig.1 Structure of DC microgrid

1.1 光伏电池建模

光伏电池的数学模型如式(1)所示^[21-22]。

$$I_{PV} = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U_{PV} - D_I}{C_2 U_{oc}}} - 1)] + D_I \quad (1)$$

其中, I_{sc} 为短路电流; U_{oc} 为开路电压; U_{PV} 、 I_{PV} 分别为输出电压和电流; 其余参数为相关系数, 描述如式(2)~(6)所示。

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}} \quad (2)$$

$$C_2 = (U_m / U_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \quad (3)$$

$$D_I = \alpha (R / R_{ref}) D_T + (R / R_{ref} - 1) I_{sc} \quad (4)$$

$$D_U = -\beta D_T - R_s D_I \quad (5)$$

$$D_T = T_c - T_{ref} \quad (6)$$

其中, I_m 、 U_m 为最大功率点电流和电压; R_{ref} 、 T_{ref} 为光照强度和光伏电池温度的参考值; α 、 β 为参考日照下的电流和电压变化温度系数; R_s 为光伏电池的串联电阻; T_c 为光伏电池温度; R 为光照强度。

1.2 燃料电池建模

燃料电池的数学模型如式(7)所示^[23]。

$$U_{FC} = E_{FC} - U_{act} - U_{con} - U_{ohm} \quad (7)$$

其中, U_{FC} 为燃料电池输出电压; E_{FC} 为燃料电池的热力学电动势; U_{act} 为活性极化损失电势; U_{con} 为浓度极化损失电势; U_{ohm} 为欧姆极化损失电势。对应公式如式(8)~(11)所示。

$$E_{FC} = N_0 \left[E_{FC0} + \frac{R_{FC} T_{FC}}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} + \ln P \right] \quad (8)$$

$$U_{act} = a + b \lg i_{FC} \quad (9)$$

$$U_{con} = -\frac{R_{FC} T_{FC}}{2F} \ln \left(1 - \frac{i_{FC}}{i_{FCL}} \right) \quad (10)$$

$$U_{ohm} = 0.126 I_{FC} e^{-2.870 \left(\frac{1}{1273} - \frac{1}{T_c} \right)} \quad (11)$$

其中, N_0 为串联电池数量; E_{FC0} 为开路电压; R_{FC} 为通用气体常数; T_{FC} 为工作温度; F 为法拉第常数; P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 P_{H_2O} 分别为氢气、氧气和水蒸气的压力; P 为电池堆系统压力; a 、 b 为塔菲尔常数; i_{FC} 、 i_{FCL} 为燃料电池的电流密度和极限电流密度; I_{FC} 为电池堆电流。

1.3 蓄电池建模

蓄电池的数学模型如式(12)所示。

$$U_{Bat} = E_{Bat0} + E_{dyn} + E_{NL} + E_{sp} - i_{Bat} R_{Bat} \quad (12)$$

其中, U_{Bat} 、 E_{Bat0} 、 i_{Bat} 、 R_{Bat} 分别为蓄电池的输出电压、开路电压、放电电流及内阻; E_{dyn} 为浓度极化电压; E_{NL} 为活性极化电压; E_{sp} 用于拟合蓄电池充放电过程中的指数变化过程。对应公式如式(13)~(15)所示。

$$E_{dyn} = \begin{cases} -K \frac{Q}{Q - \int i_{Bat} dt} & \text{放电时 } (i_{Bat} > 0) \\ Q - \int i_{Bat} dt & \\ -K \frac{Q}{0.1Q + \int i_{Bat} dt} & \text{充电时 } (i_{Bat} < 0) \end{cases} \quad (13)$$

$$E_{NL} = -K \frac{Q}{Q - \int i_{Bat} dt} \int i_{Bat} dt \quad (14)$$

$$E_{sp} = L^{-1} \left[\frac{A}{[1 / (B |i_{Bat}|)] s + 1} s^{s_{Bat}} \right] \quad (15)$$

其中, K 为极化电压; Q 为蓄电池容量; A 、 B 分别为指数曲线的峰值电压及时间常数的倒数; s_{Bat} 为蓄电池的工作状态, 对应公式如式(16)所示。

$$s_{Bat} = \begin{cases} 0 & \text{放电时 } (i_{Bat} > 0) \\ 1 & \text{充电时 } (i_{Bat} < 0) \end{cases} \quad (16)$$

2 智能多代理系统的实现

2.1 多代理系统的适用性

多代理系统能够通过模拟人类社会系统的运作机制提高计算机系统解决复杂问题的能力, 能够将大而复杂的系统分解成由多个代理组成的系统, 各代理既能够分别执行各自不同的任务, 又能够通过协调合作的方式解决单个代理不能解决的复杂问题, 适合微网分散而又复杂的控制。

a. 自治性: 代理具有控制自身的能力, 在没有外界的干扰下, 能够根据自身的情况控制自身完成一定的任务。

b. 协作性: 各代理之间能够相互通信, 一个代理可以向其他代理发送自身的状态, 并协同其他代理完成一定的任务。

c. 反应性: 代理可以从环境或者其他代理处得到信息, 并能够根据得到的信息作出合理的反应, 改变自身的状态。

2.2 多代理系统结构

基于多代理系统的能量控制系统如图 2 所示。

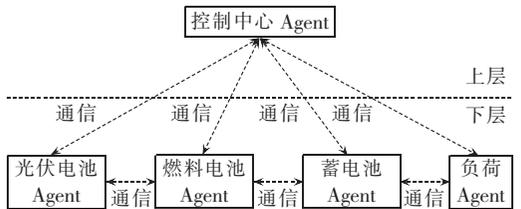


图 2 多代理系统结构

Fig.2 Structure of MAS

系统中, 上层的控制中心 Agent 用于收集下层各 Agent 的信息, 并制定合理方案, 同时将方案下传到下层的 Agent。此外, 控制中心 Agent 还控制着直流微网的并网及解列。下层的 Agent 由光伏电池、燃料电池、蓄电池及负荷 4 个子 Agent 组成。各子

Agent 上传各自运行参数到控制中心 Agent, 根据控制中心 Agent 下传的方案及各自情况决定运行状态。同时下层各 Agent 还分别具有以下不同的功能:

a. 光伏电池 Agent 具有最大功率点跟踪 (MPPT) 功能, 使光伏能够输出最大功率, 同时还具有决定是否接入微网的功能;

b. 燃料电池 Agent 具有监测运行状态及决定是否接入微网的功能;

c. 蓄电池 Agent 能够监测电压、剩余容量等运行参数, 且具有决定蓄电池充放电的功能, 本文设定当 SoC 低于 20% 时不允许放电, 当 SoC 高于 90% 时不允许充电;

d. 负荷 Agent 能计算当前的总负荷功率, 并可以根据分布式电源的总功率和总负荷功率的大小及控制中心是否下达减载信息等情况决定是否减载, 同时还能根据负荷的重要程度进行合理减载。

2.3 神经网络算法

人工神经网络 ANN(Artificial Neural Network) 能够模拟人脑智能化处理, 实现多输入多输出的非线性映射, 具有信息记忆、自主学习等功能, 具有很强的自适应性及容错能力^[24-26], 有利于控制中心 Agent 对下层各 Agent 进行可靠的管理, 所以本文选择神经网络作为控制中心 Agent 的决策器。

本文设计的神经网络用于实现以下目标: 初始时, 光伏电池工作在 MPPT 模式, 同时经 DC/DC 变换恒压输出, 当光伏电池最大输出大于负荷功率时, 若蓄电池允许充电, 则将多余电能储存到蓄电池中, 否则光伏电池不实现 MPPT, 仅实现恒压输出; 当光伏电池不足以提供足够能量时, 根据燃料电池能否放电, 决定燃料电池是否放电; 再根据功率平衡条件是否满足及蓄电池能否放电决定蓄电池是否放电; 之后, 若光伏电池、燃料电池及蓄电池无法满足功率要求, 根据大电网能否提供电能决定是并网还是减载。因此, 该神经网络能控制系统使可再生分布式电源得到充分利用, 大电网输出尽量减少, 可在保证用户正常用电的基础上尽可能减少化石能源的消耗及用电支出。

为实现以上目标, 首先构造一个 2 层的 BP 神经网络, 结构见图 3, 其中, P 、 T 为输入和输出数据, W_1^{1-1} 、 W_2^{2-1} 为权重矩阵, b^1 、 b^2 为阈值, 隐层和输出层分别有 17 和 8 个神经元, 传递函数均使用 $\text{logsig}(\cdot)$ 。该神经网络的输入层、输出层数据如表 1 和表 2 所示。其中输入层由 8 个特征参数组成, 这些参数由下层各 Agent 上传, 包括光伏电池、燃料电池、蓄电池、电网及负荷的运行状况; 输出层的 8 个输出组成了 13 种输出可能, 代表 13 种协调控制命令, 对燃料电池、蓄电池、电网及负荷进行控制。表 3 为对应的 13 种协调控制命令。最后, 通过随机产生 10 000 组训练样本完成训练, 并生成 Simulink 模块。

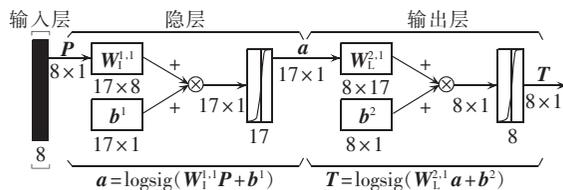


图 3 BP 神经网络结构

Fig.3 Structure of BP neural network

表 1 输入层特征参数

Tab.1 Characteristic parameters at input layer

元件	特征参数	特征值	说明
光伏电池	最大输出功率	P_{mp}	
	是否允许放电	1	允许放电
燃料电池	是否允许放电	0	禁止放电
	最大输出功率	P_{mf}	
蓄电池	是否允许放电	1	允许放电
	是否允许放电	0	禁止放电
	是否允许充电	1	允许充电
	是否允许充电	0	禁止充电
电网	最大输出功率	P_{mb}	
	是否允许放电	1	允许放电
负荷	是否允许放电	0	禁止放电
	负荷功率	P_L	

表 2 输出层特征参数

Tab.2 Characteristic parameters at output layer

元件	特征参数	特征值	说明
光伏电池	放电情况	0	MPPT 模式下恒压输出
		1	非 MPPT 模式下恒压输出
燃料电池	放电情况	1,0	恒压放电
		0,0	不放电
		0,1	最大功率放电
蓄电池	放电情况	1,0	恒压放电
		0,0	不放电
	是否充电	0,1	最大功率放电
		1	充电
电网	是否放电	0	不充电
		1	放电
负荷	是否减载	1	放电
		0	不放电
		1	减载
		0	不减载

表 3 能量协调控制输出

Tab.3 Outputs of energy coordination control

光伏电池 放电情况	燃料电池 放电情况	蓄电池 放电情况		是否充电	电网 是否放电	负荷 是否减载
1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	1

3 算例分析

本文的仿真系统包括光伏电池、燃料电池、蓄电池各 1 台,其中,燃料电池、蓄电池的最大输出功率分别为 2 kW 和 2.5 kW,蓄电池初始 SoC 为 50%。系统中还存在大电网及 1 kW 一级、2 kW 二级、2 kW 三级这 4 种负荷。通过该系统分别对光照变化、并网运行时负荷增加后电网断电及孤岛运行时负荷增加后并网这 3 种情况进行仿真。

3.1 算例 1

负荷保持 1 kW 不变,当光照如图 4(a)所示变化时,直流母线电压情况见图 4(b),负荷功率 P_L 、光伏电池功率 P_{PV} 、燃料电池功率 P_{FC} 、蓄电池功率 P_{Bat} 、电网功率 P_{Grid} 变化情况见图 5。其中,负荷输入为正,光伏电池、燃料电池、蓄电池及电网输出为正。

初始时光照强度为 800 W/m²,光伏电池最大输出功率约为 1 250 W,能够保证 1 kW 负荷的正常运

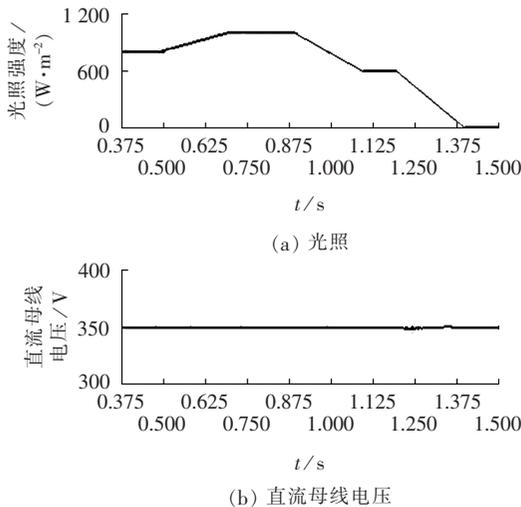


图 4 光照及直流母线电压情况

Fig.4 Light intensity and voltage of DC bus

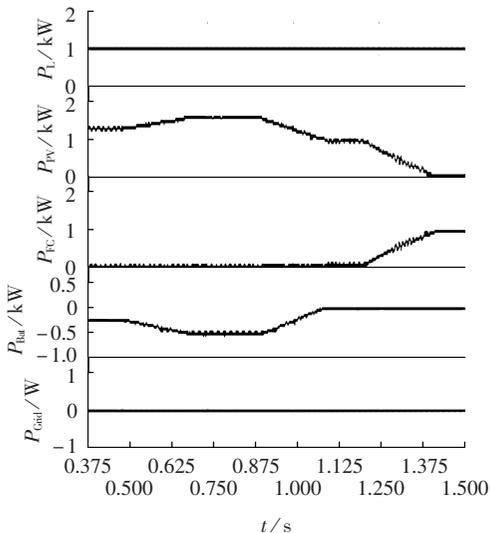


图 5 能量协调控制结果 1

Fig.5 Results of energy coordination control in case 1

行,由于蓄电池的初始 SoC 为 50%,满足充电要求,蓄电池 Agent 允许蓄电池充电,控制中心 Agent 接收到蓄电池允许充电的信息后,发出(0,0,0,0,0,1,0,0)的命令,蓄电池充电;0.5~0.9 s,光照强度逐渐增强至 1 000 W/m² 并保持不变,光伏的最大输出也增至 1 580 W 并维持不变,此时控制中心 Agent 仍然发出(0,0,0,0,0,1,0,0)的命令,蓄电池保持充电状态且充电功率逐渐增至 580 W 并维持不变;0.9~1.2 s,光照强度逐渐减弱至 600 W/m² 并维持不变,光伏最大输出减小为 940 W,其中 1.08 s 时,光伏最大输出为 1 000 W,则在 0.9~1.08 s 过程中,控制中心 Agent 仍然发出(0,0,0,0,0,1,0,0)的命令,而在 1.08~1.2 s 过程中,光伏电池无法满足负荷需求,由于燃料电池允许放电且与光伏的最大总输出功率能够满足负荷要求,控制中心 Agent 发出(0,1,0,0,0,0,0,0)的命令,蓄电池停止充电,燃料电池开始恒压放电;在 1.2 s 之后,光伏输出随着光照的降低而减少,控制中心 Agent 仍然发出(0,1,0,0,0,0,0,0)的命令,燃料电池继续恒压放电,且输出功率逐渐增大。

3.2 算例 2

初始时微网并网运行,并带有一级负荷 1 kW,0.5 s、0.75 s、1 s 时分别增加二级、三级及一级负荷各 2 kW,大电网在 1.25 s 时断开,微网进入孤岛运行状态。对应的功率变化情况如图 6 所示。

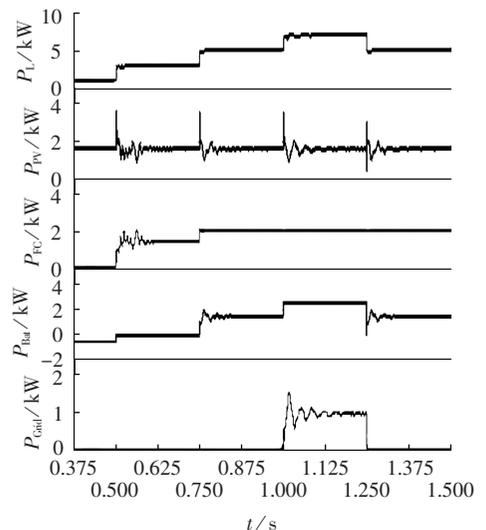


图 6 能量协调控制结果 2

Fig.6 Results of energy coordination control in case 2

开始时,光伏最大输出功率约为 1.58 kW,系统中只存在 1 kW 一级负荷,由于蓄电池 SoC 为 50%,蓄电池 Agent 允许蓄电池充电,控制中心 Agent 接收到蓄电池允许充电的信息后,发出(0,0,0,0,0,1,0,0)的命令,蓄电池充电;0.5 s 时增加 2 kW 二级负荷,光伏不足以提供所需电能,将由其他电源提供缺额电能。此时燃料电池允许放电且与光伏的最大总输

输出功率为 3.58 kW, 能够满足负荷需求, 控制中心 Agent 下达(0,1,0,0,0,0,0)的控制任务, 蓄电池停止充电, 燃料电池恒压放电; 0.75 s 时增加 2 kW 三级负荷, 光伏及燃料电池无法满足负荷要求, 但蓄电池的 SoC 允许其放电且光伏、燃料电池及蓄电池的最大总输出功率为 6.08 kW, 能够满足负荷要求, 控制中心 Agent 发出(0,0,1,1,0,0,0)的命令, 燃料电池最大功率放电, 蓄电池恒压放电; 1 s 时增加 2 kW 一级负荷, 光伏、燃料电池及蓄电池无法满足负荷要求, 控制中心 Agent 将发出(0,0,1,0,1,0,1,0)的命令, 燃料电池及蓄电池最大功率放电, 大电网开始向微网提供电能; 1.25 s 时, 大电网断电, 此时, 系统微源发出的功率无法满足负荷, 控制中心将发出(0,0,1,0,1,0,0,1)的命令, 通知负荷 Agent 减载。负荷 Agent 接收到减载信息后, 将根据从光伏电池 Agent、燃料电池 Agent、蓄电池 Agent 得到的最大输出功率之和与此时的负荷情况进行比较, 选择合理的减载方式。本算例中, 负荷 Agent 选择断开 2 kW 三级负荷, 对应的负荷投入及减载情况如图 7 所示。减载完成后, 控制中心 Agent 经过决策, 再次发出(0,0,1,1,0,0,0,0)的命令, 要求燃料电池最大功率放电, 蓄电池恒压放电。对应的直流母线电压如图 8 所示。可见, 该能量协调控制能较好地恢复并维持直流母线电压在 350 V 左右。

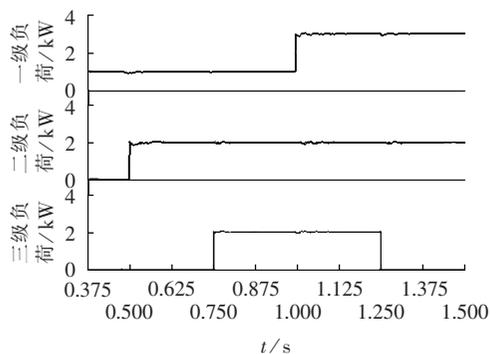


图 7 负荷 Agent 对负荷的控制结果 1

Fig.7 Results of load control by load Agent in case 1

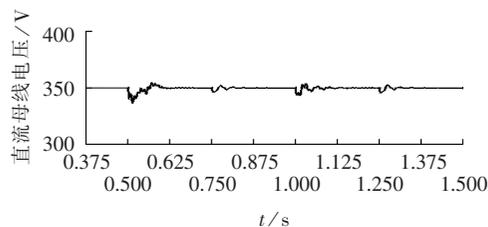


图 8 直流母线电压

Fig.8 Voltage of DC bus

3.3 算例 3

初始时微网孤岛运行, 并带有一级负荷 1 kW, 在 0.5 s、0.75 s、1 s 时分别增加二级、三级及一级负

荷各 2 kW, 1.25 s 时微网与大电网连接, 进入并网运行状态。功率变化情况如图 9 所示。

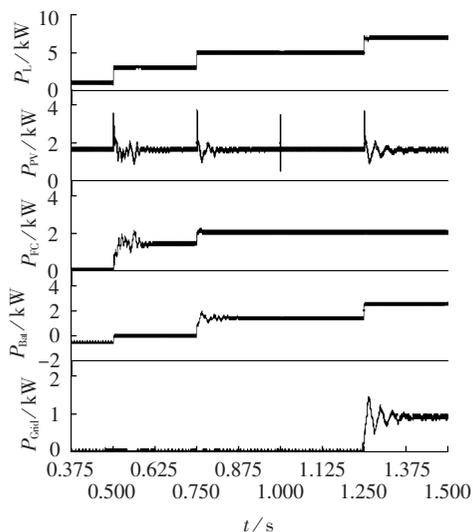


图 9 能量协调控制结果 3

Fig.9 Results of energy coordination control in case 3

1 s 前, 光伏电池、燃料电池及蓄电池的最大功率能够满足负荷要求, 能量协调控制决策与算例 2 前 1 s 的情况相同。1 s 时, 增加 2 kW 一级负荷, 由于此时大电网不允许放电, 而光伏电池、燃料电池及蓄电池不足以提供所需电能, 控制中心 Agent 发出(0,0,1,0,1,0,0,1)的命令, 通知负荷 Agent 减载, 负荷 Agent 接收到减载信息后, 针对该情况决定连接 2 kW 一级负荷的同时, 断开 2 kW 三级负荷, 确保电压稳定的同时使重要负荷能够正常运行, 断开三级负荷后, 控制中心 Agent 将发出(0,0,1,1,0,0,0,0)的命令; 1.25 s 时, 微网与大电网并网, 负荷 Agent 确认大电网能够向微网提供电能后, 将重新连接之前被断开的三级负荷, 从而控制中心 Agent 将发出(0,0,1,0,1,0,1,0)的命令, 使蓄电池最大功率放电, 大电网向微网提供电能, 保证功率平衡, 维持电压稳定。对应的负荷变化情况以及直流母线电压分别如图 10 和图 11 所示。

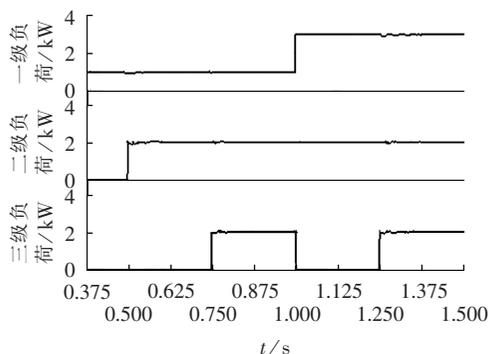


图 10 负荷 Agent 对负荷的控制结果 2

Fig.10 Results of load control by load Agent in case 2

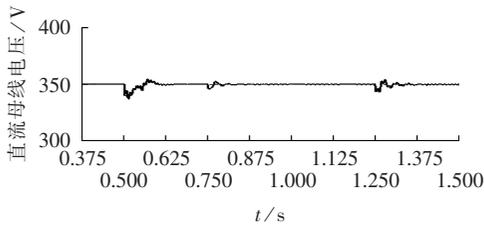


图 11 直流母线电压
Fig.11 Voltage of DC bus

4 结论

本文提出了一种基于智能多代理技术的直流微网控制系统,主要有以下特点:

- a. 下层各 Agent 既能根据自身情况自主运行,又能彼此协作,充分发挥了代理的自治性和协作性;
- b. 上层的控制中心 Agent 以神经网络作为决策器,能够根据下层各 Agent 上传的信息作出合理的响应,实现了分层控制,保证了能量的合理流动;
- c. 通过多代理系统,在发生负荷增加及孤岛和并网的状态转换等情况下,能有效维持直流母线电压的稳定。

此外,JADE 平台为多代理系统提供了一个很好的开发平台,对于本文提出的控制系统在 JADE 平台上的开发将是下一步的主要工作。

参考文献:

- [1] 施婕,郑潭化,艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):86-90.
SHI Jie,ZHENG Zhonghua,AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(2):86-90.
- [2] 温家良,吴锐,彭畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang,WU Rui,PENG Chang,et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(13):7-12.
- [3] CPES at Virginia Tech. Sustainable Building Initiative(SBI)[EB/OL]. [2007-09-01]. <http://www.cpes.vt.edu/public/areas/sbi.php>.
- [4] HAN B M. Overview of micro-grid research & development plan in Korea[EB/OL]. [2008-06-02]. http://der.lbl.gov/sites/der.lbl.gov/files/Han_2008.pdf.
- [5] 日经 BP 社. 直流供电数据中心在日本正式启动[EB/OL]. [2013-03-25]. <http://china.nikkeibp.com.cn/news/digi/65293-20130322.html>.
- [6] 张娜. 直流电“复仇”[EB/OL]. [2013-01-14]. <http://www.inengyuan.com/2013/0111/2140.html>.
- [7] CUZNER R, VENKATARAMANAN G. The status of DC micro-grid protection[C]//Industry Applications Society Annual Meeting, IAS'08. Edmonton, Alta, Canada:IEEE,2008:1-8.
- [8] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. Protection of low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009,24(3):1045-1053.
- [9] LEE Wonseok,KANG Sanghee. Protection for distributed generations in the DC micro-grid [C]//PES International Conference and Exhibition,ISGT Europe'12. Manchester,England:IEEE,2012:1-5.
- [10] LAI Chingming,PAN Chingtsai,CHENG Mingchieh. High-efficiency modular high step-up interleaved Boost converter for DC-microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(1):161-171.
- [11] HSIEH Yiping,CHEN Jiannfuh,LIANG Tsorngjun,et al. A novel high step-up DC-DC converter for a microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(4):1127-1136.
- [12] ROGGIA L,SCHUCH L,BAGGIO J E,et al. Integrated full-bridge-forward DC-DC converter for a residential microgrid application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4):1728-1740.
- [13] KAKIGANO H,MIURA Y,ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(12):3066-3075.
- [14] 薛贵挺,张焰,祝达康. 孤立直流微电网运行控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):112-117.
XUE Guiting,ZHANG Yan,ZHU Dakang. Operational strategy of stand-alone DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):112-117.
- [15] XU Lie,CHEN Dong. Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2513-2522.
- [16] 王毅,张丽荣,李和明,等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
WANG Yi,ZHANG Lirong,LI Heming,et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):16-24.
- [17] 吴志,顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):57-61.
WU Zhi,GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):57-61.
- [18] LOGENTHIRAN T,SRINIVASAN D,KHAMBADKONE A M,et al. Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012,3(2):925-933.
- [19] 郝雨辰,吴在军,窦晓波,等. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):27-35.
HAO Yuchen,WU Zaijun,DOU Xiaobo,et al. Application of multi-agent systems to the DC microgrid stability control [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):27-35.
- [20] 广东华南家电研究院. 直流家电技术与发展前景[J]. 家电科技,2009(22):48-49.
- [21] 菲美琴,余世杰,苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报,2005,17(5):1248-1251.
MAO Meiqin,YU Shijie,SU Jianhui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation,2005,17(5):1248-1251.
- [22] 刘东冉,陈树勇,马敏,等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术,2011,35(8):47-52.
LIU Dongran,CHEN Shuyong,MA Min,et al. A review on models for photovoltaic generation system [J]. Power System Technology,2011,35(8):47-52.
- [23] 钱军,李欣然,王玲,等. 面向负荷的光伏电池和燃料电池建模及其等效描述[J]. 电网技术,2011,35(4):135-142.

- QIAN Jun, LI Xinran, WANG Ling, et al. Load modeling oriented modeling of photovoltaic cell and fuel cell and its equivalent description[J]. Power System Technology, 2011, 35(4):135-142.
- [24] 王铭, 徐玉琴. 基于小波变换和 BP 网络的非故障相暂态电流故障定位[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4):25-27.
- WANG Ming, XU Yuqin. Location fault using transient component of non-fault-phase based on wavelet analysis and BP neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4):25-27.
- [25] JONGEPIER A G, van der SLUIS L. Adaptive distance protection of double-circuit lines using artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1):97-105.
- [26] 秦英林, 田立军, 常学飞. 基于小波变换能量分布和神经网络的电能质量扰动分类[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7):64-67.

QIN Yinglin, TIAN Lijun, CHANG Xuefei. Classification of power quality disturbance based on wavelet energy distribution and neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7):64-67.

作者简介:

王晶(1974-), 女, 河南邓县人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统建模、电能质量仿真与识别、人工智能方法在电力系统中的应用、微网控制与优化方法(**E-mail**: kmhelen@zjut.edu.cn);

李瑞环(1990-), 男, 浙江富阳人, 主要研究方向为直流微网的能量协调控制(**E-mail**: liruihuanzjh@gmail.com);

束洪春(1961-), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护和智能电网的稳定控制。

Energy coordination control based on intelligent MAS for DC microgrid

WANG Jing¹, LI Ruihuan¹, SHU Hongchun²

(1. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: An energy coordination control based on intelligent MAS (Multi Agent System) is proposed for the energy management and voltage control of DC microgrid. The framework of DC microgrid is designed and the mathematic models are established for PV, fuel cell and battery. A two-layer MAS is designed for the coordination control: the grid-connection and islanding of DC microgrid and the energy management of PV cells, fuel cells, loads and battery. 8 characteristic variables and 13 operations are extracted from various conditions of micro-sources and loads as, respectively, the input and output parameters of a neural network, which is then trained to obtain the decision maker of central Agent. The proposed strategy of energy coordination control is verified by simulation with MATLAB/Simulink for three operating conditions: variable light intensity, islanding after load increase and grid-connection after load increase.

Key words: multi agent systems; DC microgrid; neural networks; energy management; coordination control; voltage control

(上接第 131 页 continued from page 131)

作者简介:

张宁宇(1985-), 男, 山西忻州人, 博士研究生, 研究方向为并行计算、分布式发电运行与控制及负荷预测(**E-mail**: zhangny190@163.com);

高山(1973-), 男, 山东济南人, 副教授, 研究方向为电

力系统规划与优化运行、人工智能在电力系统应用、分布式发电运行与控制、负荷预测(**E-mail**: shangao@seu.edu.cn);

赵欣(1983-), 男, 安徽池州人, 博士研究生, 研究方向为无功优化、电力系统次同步振荡、电力系统稳定分析、并行计算(**E-mail**: fzhjctl@163.com)。

GPU parallel algorithm of interior point SDP for unit commitment

ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Because the time consumption is too heavy when the interior point algorithm is used to solve the SDP (SemiDefinite Programming) model of unit commitment, the Krylov subspace parallel algorithm based on GPU (Graphic Processing Unit) is proposed, which, based on the matrix sectioning technology and in CSR storage format, applies the preconditioned QMR (Quasi-Minimal Residual) method to calculate the parallel Incomplete Cholesky preconditioning matrix by GPU. Analysis of the calculations for linear equation sets of different sizes shows that, with better parallel speedup ratio, QMR parallel algorithm is superior to the traditional Cholesky direct method in speed and memory. Simulative results of six systems of 10~100 units also show that, an approximate optimal solution can be obtained with less computing time by the SDP parallel interior point method.

Key words: unit commitment; semidefinite programming; GPU; QMR; Incomplete Cholesky decomposition; parallel algorithms; Krylov; linear programming