

计及灵活性储备的含风电多微电网系统 分布式协调调控策略

边晓燕¹,孙明琦¹,许家玉²,王小宇¹,李国庆³,李东东¹

(1. 上海电力大学 电气工程学院,上海 200090;2. 国网宁波供电公司,浙江 宁波 315020;
3. 国网新疆电力有限公司电力调控中心,新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要:高比例风电的接入和需求响应技术的应用对分布式架构下的多微电网系统有功功率动态平衡提出了更高的要求,有必要充分利用灵活性资源对系统进行协调调控。提出一种新颖的灵活性电池储备模型对多微电网系统灵活性备用容量进行评估,定义虚拟灵活性电池储备模型对风电场备用与需求响应负荷备用进行评估,充分挖掘其调频的潜在能力。在此基础上,基于一致性算法求解该模型下各微电网的功率分配,提出计及灵活性储备的含风电多微电网系统分布式协调调控策略,实现分布式架构下灵活性资源的协调优化。通过华东某地区实际数据验证了所提策略的有效性。算例结果表明,协调优化源-荷灵活性储备资源在保障风电消纳的同时,实现了分布式架构下系统的动态功率平衡。

关键词:灵活性电池储备模型;多微电网;一致性算法;源-荷协调;可变减载率

中图分类号:TM 73;TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202104013

0 引言

大规模风电的接入以及需求响应技术的推广,对分布式架构下多微电网MMG(Multi-MicroGrid)系统实时功率平衡提出了更高的要求^[1],电网应对分布式单元DU(Distributed Unit)随机波动的快速调节能力成为系统稳定运行的关键技术手段^[2]。调度部门需要评估可控负荷和风电接入的源-荷双向变化场景下系统运行备用容量是否充足,将当前电力系统的备用容量和灵活性概念相结合,对灵活性储备模型进行合理定义^[3-4]。因此,有必要建立一种计及灵活性储备的多微电网系统分布式协调调控策略,对多微电网间灵活性资源进行评估及协调优化。

为了更好地分析各分布式单元相互协调参与电力系统平衡调节的能力,首先需要对各区域内的各种可调控灵活性设备进行统一量化处理^[5]。文献[6-7]提出基于概率分布的多时间尺度灵活性供需平衡数学模型,但由于其针对的是全网系统下源-网-荷-储灵活性资源的综合优化,分布式架构下基于卷积求和的概率法模型难以处理大量的分布式设备^[8]。文献[9]提出通过建立“节点功率”的模型来量化灵活性指标,是一种经典的灵活性评估方法。

文献[10]提出采用“虚拟电池”模型作为节点灵活性资源聚合与量化的手段,对用户侧灵活性进行整合。上述2种思想本质上是将系统的灵活性资源等值成储能元件,储能元件由于具有功率双向流动、状态相关性等特点,可以很好地表征系统的灵活性特性。但现有研究主要是对负荷侧进行灵活性聚合,源侧分布式风机都是作为不可调控单元进行处理。文献[11]指出对风机出力进行合理设置并使其保留一定裕度时,可将其处理为可控单元。本文借鉴“节点功率”与“虚拟电池”的思想,从能量的维度对包含分布式风机等灵活性资源的多微电网系统进行分析,提出灵活性电池储备FBR(Flexible Battery Reserve)模型,运用该模型对各微电网MG(MicroGrid)进行灵活性统一量化,实现分布式架构下各种灵活性资源的归一化处理。

为了更好地利用风能参与系统有功功率平衡调控,将风资源所能提供的灵活性储备容量定义为虚拟灵活性电池模型。文献[12]指出未来风机渗透率的不断提升将造成系统惯性以及提供一次调频的容量下降等问题。为了释放风机中潜在的动能,一般都是对有功功率基准值进行修正。文献[13-14]采用超速控制参与系统调频,但由于风机采用固定减载率参与调频,因此不能根据系统的灵活性需求实时变化调整风机的备用容量。文献[15]综合考虑电网输送的有功功率、提供的备用容量与系统参与调频等因素,提出一种可变减载率超速控制方法。

综上,本文提出一种新颖的计及灵活性储备的含风电多微电网系统分布式协调调控策略。定义灵活性电池储备模型,对多微电网系统灵活性资源进

收稿日期:2020-05-30;**修回日期:**2021-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977128);上海市科学技术委员会资助项目(19020500800);上海市教育委员会“曙光计划”项目(18SG50)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977128),the Project of Shanghai Science and Technology Committee(19020500800) and “Shuguang Project” of Shanghai Municipal Education Commission(18SG50)

行评估;结合源侧风电场备用容量与荷侧需求响应负荷备用容量,挖掘含风电的多微电网系统灵活性资源间的协调调控潜能;基于分布式一致性算法求解灵活性电池储备模型,对各微电网的功率进行协调分配,实现多微电网系统灵活性资源的分布式协调优化。

1 系统建模

1.1 多智能体系统建模

本文采用多智能体架构 MAS(Multi-Agent System)对多微电网系统进行分布式调控^[16],如图1所示。在多智能体架构中可将智能体分为微电网下层管理智能体、微电网上层全局优化智能体和微电网上层局部优化智能体3类,对应的具体功能如下。

(1)微电网下层管理智能体。在多微电网系统中,每个微电网包含各种分布式单元,包括含常规能源的可控分布式发电 CDG(Controllable Distributed Generation)单元,含可再生能源的分布式发电 RDG(Renewable Distributed Generation)单元,具有调控特性的灵活性负荷 FL(Flexible Load)以及分布式储能单元 DSU(Distributed Storage Unit)。每个分布式单元都安装有智能体,各微电网下层管理智能体之间可通过通信线路进行信息的交互与计算,对各分布式单元进行优化与调整的同时还可以进行日前调度规划对该区域微电网的灵活性备用容量进行评估。

(2)微电网上层全局优化智能体。该智能体负责多微电网之间的协调优化。当源侧或者荷侧等各种不确定性因素造成系统功率不平衡时,通过微电网上层全局优化智能体对各微电网下达指令进行调整并合理分配各微电网功率,实现全局功率灵活动态平衡。

(3)微电网上层局部优化智能体。在进行多微

电网间全局优化后,对各子微电网内分布式单元进行调整。微电网上层局部优化智能体在接收到微电网上层全局优化智能体下达的指令后,根据一致性算法得出各分布式单元的调整策略,并将该优化结果传达给微电网下层管理智能体对分布式单元进行优化控制。

1.2 灵活性电池储备模型

为了平抑由于可再生能源和新型负荷的源-荷双向不确定性所产生的功率波动,有必要充分利用系统中可调控的灵活性资源。本文定义灵活性为分布式单元向电网注入或者从电网吸收功率以平抑系统中不平衡功率的能力。由于对采用不同的运行和控制方法的分布式单元进行全面统一的评估本身就是一项挑战,本文定义灵活性电池储备模型来评估分布式架构下多微电网系统的灵活性。

对于具有多智能体架构的多微电网系统,每个微电网的输出功率如图2所示,图中浅灰色表示每个微电网在上一时刻的电量状态,深灰色表示本地微电网调整的电量,黑色表示在进行全局优化后向邻近微电网所发送的电量。

以图2为例,在调度时间间隔 Δt 时间后各微电网中负荷发生变化,其中微电网 MG_1 和 MG_3 中分布式电源所能提供的出力小于该时刻 MG_1 和 MG_3 中的负荷需求, MG_2 通过灵活性电池储备模型评估该区域中可调控的灵活性功率,灵活性储备大的 MG_2 可以承担更多的负荷变化量,并将多余的电量向 MG_1 和 MG_3 转移,因此, MG_2 可以向电网以更低的价格出售电量以此弥补 MG_1 所缺的功率,同时将剩下的盈余功率输送给 MG_3 ,以此减少 MG_3 的发电需求。

借鉴“节点功率”的思想^[13-14],本文从能量维度定义灵活性电池储备模型,评估分布式架构下第 i 个微电网中可调节灵活性功率的能力。在本文中,假定时间是离散的,定义第 i 个微电网系统的功率状态

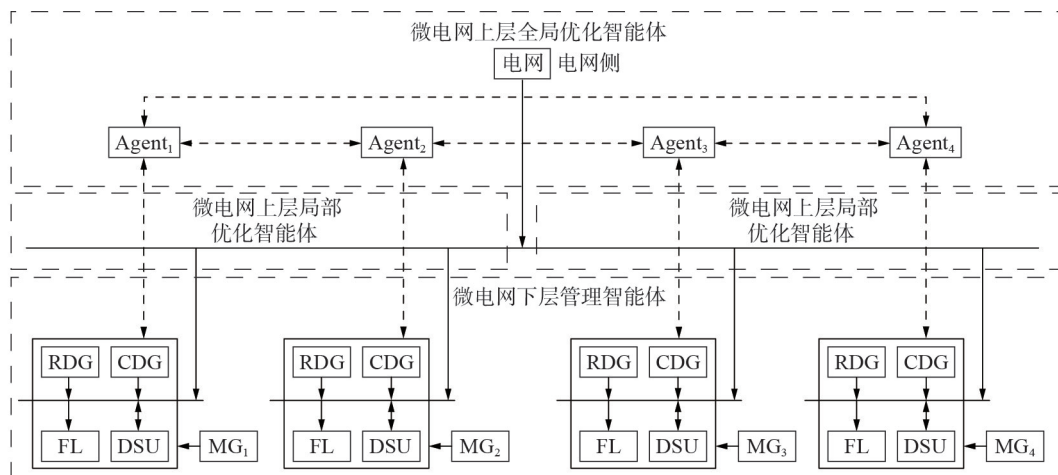


图1 多智能体架构多微电网系统

Fig.1 Multi-microgrid system based on MAS

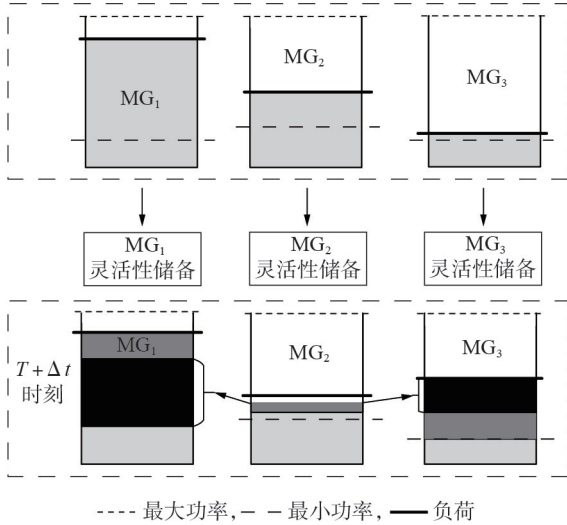


图2 多微电网系统灵活性电池储备模型

Fig.2 Flexible battery reserve model of multi-microgrid system

变量 $\{P_{i,t}^F\}_{i \in I}$ (I 为采用灵活性电池储备下微电网集合) 满足:

$$E_{i,t+1}^{\text{FBR}} = \begin{cases} E_{\text{MG}_i,t}^{\text{L}} + \eta_+ P_{i,t}^F \Delta t & P_{i,t}^F \geq 0 \\ E_{\text{MG}_i,t}^{\text{L}} + \frac{1}{\eta_-} P_{i,t}^F \Delta t & P_{i,t}^F < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{i,t}^F \leq \bar{P}_{i,t}^F \leq \bar{P}_{i,t}^F \quad (2)$$

$$\bar{E}_{i,t+1}^{\text{FBR}} \leq E_{i,t+1}^{\text{FBR}} \leq \bar{E}_{i,t+1}^{\text{FBR}} \quad (3)$$

其中, $E_{i,t+1}^{\text{FBR}}$ 为在 $t+1$ 时刻第 i 个微电网中灵活性储备能量; $E_{\text{MG}_i,t}^{\text{L}}$ 为在 t 时刻第 i 个微电网所承担的负荷量; $P_{i,t}^F$ 为第 i 个微电网的灵活性电池储备模型在 Δt 时间内的可调节灵活性功率; η_+ 、 η_- 分别为灵活性电池充、放电效率, 其并非常数, 而是与 $E_{\text{MG}_i,t}^{\text{L}}$ 相关; $\bar{P}_{i,t}^F$ 、 $\underline{P}_{i,t}^F$ 分别为第 i 个微电网的灵活性电池储备模型在 Δt 时间内的可调节灵活性功率上、下限; $\bar{E}_{i,t+1}^{\text{FBR}}$ 、 $\underline{E}_{i,t+1}^{\text{FBR}}$ 分别为在 $t+1$ 时刻第 i 个微电网灵活性能量上、下限。

定义 $E_{\text{MG}_i,t}^{\text{L}} = C_{i,t} E_{\text{MG}_i}^{\text{FBR}}$ 。其中, $C_{i,t}$ 为第 i 个微电网在 t 时刻的能量状态变量, 其取值范围为 $0 \leq C_{i,t} \leq 1$, 主要由在 t 时刻第 i 个微电网所承担的负荷决定; $E_{\text{MG}_i}^{\text{FBR}}$ 为第 i 个微电网中所有分布式电源可调节灵活性功率的总容量。则有:

$$E_{i,t+1}^{\text{FBR}} = \begin{cases} C_{i,t} E_{\text{MG}_i}^{\text{FBR}} + \eta_+ P_{i,t}^F \Delta t & P_{i,t}^F \geq 0 \\ C_{i,t} E_{\text{MG}_i}^{\text{FBR}} + \frac{1}{\eta_-} P_{i,t}^F \Delta t & P_{i,t}^F < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2 虚拟灵活性电池储备模型

为了充分挖掘源侧基于可变减载率超速控制的分布式风机及荷侧需求响应负荷提供的备用容量, 本

文定量分析其灵活性储备并将该备用容量定义为虚拟灵活性电池储备 VFBR (Virtual Flexible Battery Reserve) 模型。由于电池单元具有功率双向流动、状态相关性的特点, 因此本文采用电池单元模型表征系统的灵活性。现有研究都是将新能源的分布式发电单元作为不可调单元进行处理, 且很少考虑需求响应技术下负荷的备用容量, 同时可以通过控制将分布式风机吸收的风能转化为转子的动能进行能量储备, 作为一种隐藏的能量为系统提供动态灵活性功率平衡调节支撑^[11-12], 因此本文定量分析分布式风机和需求响应负荷所能调控的灵活性功率, 将定义的灵活性电池储备模型扩展为由实际灵活性电池储备 RFBR (Real Flexible Battery Reserve) 和 VFBR 构成, 如式(5)所示。

$$E_{i,t+1}^{\text{FBR}} = E_{i,t+1}^{\text{RFBR}} + E_{i,t+1}^{\text{VFBR}} \quad (5)$$

其中, $E_{i,t+1}^{\text{RFBR}}$ 为在 $t+1$ 时刻第 i 个微电网中常规电源提供的灵活性能量; $E_{i,t+1}^{\text{VFBR}}$ 为在 $t+1$ 时刻第 i 个微电网中源侧风电场备用与荷侧负荷备用提供的灵活性能量。

2.1 风机灵活性储备分析

风机所能获得的机械功率 P 为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi v_w^3 C_p(\lambda) \quad (6)$$

其中, ρ 为空气密度; π 为风机迎风面积; v_w 为风速; λ 为叶尖速比, 是尖端速度 $V_{\text{tip}} = \omega_r R$ 和风速 v_w 的比值, 如式(7)所示; $C_p(\lambda)$ 为风能利用系数。

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \quad (7)$$

其中, ω_r 为风机转子转速; R 为叶片半径。

在正常情况下, 风机运行在最大功率点追踪 (MPPT) 曲线上。当需要风机参与系统调频时, 风机将偏离 MPPT 曲线, 超速控制的原理如图 3 所示。图中, P_{opt} 、 P'_{opt} 、 $P_{\text{opt}}^{\text{lim}}$ 分别为 MPPT 曲线、采用减载率 d 后的风机运行功率曲线、减载后的风机运行功率曲线; 在某一固定风速 v_1 下, 当实现 MPPT 时, 风机运行于点 C , 此时的功率和风机转子转速分别为 P_C 和 ω_C ; 采用超速控制追踪曲线 P'_{opt} 时风机运行于点 A , 此时的功率和风机转子转速分别为 P_A 和 ω_A ; 由于转子转速的限制, 在临界减载率下风机运行于点 B , 此时的功率和风机转子转速分别为 P_B 和 ω_B 。

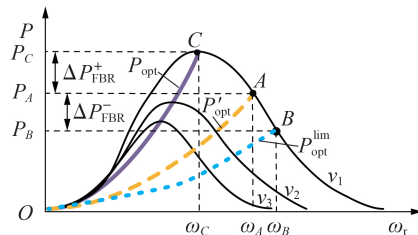


图3 超速控制原理图

Fig.3 Diagram of overspeed control principle

当给定减载率 d 时,有:

$$\begin{cases} P_C = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_{P_{\max}}(\lambda_{\text{opt}}) \\ P_A = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_{P_{\text{del}}}(\lambda_{\text{del}}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $C_{P_{\text{del}}}$ 、 λ_{del} 分别为减载后的风能利用系数和叶尖速比; $C_{P_{\max}}$ 、 λ_{opt} 分别为MPPT模式下的风能利用系数和叶尖速比。

风机提供的向上灵活性储备功率 $\Delta P_{\text{VFBR}}^{+,-}$ 可以表示为:

$$\Delta P_{\text{VFBR}}^{+,-} = P_C - P_A = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 (C_{P_{\max}} - C_{P_{\text{del}}}) = K_{\text{del}} \Delta C_P(\Delta \lambda) \quad (9)$$

其中, $K_{\text{del}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3$ 。 C_P 与 λ 的关系如图4所示,且满足:

$$d = 1 - \frac{C_{P_{\text{del}}}}{C_{P_{\max}}} = 1 - \frac{C_{P_{\max}} - \Delta C_P}{C_{P_{\max}}} = \frac{\Delta C_P}{C_{P_{\max}}} \quad (10)$$

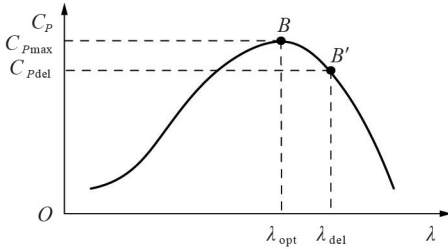


图4 C_P - λ 曲线

Fig.4 Curve of C_P - λ

2.2 风机灵活性电池储备模型

由于风速的变化,允许分布式风机转子转速在短时间内偏离最优运行点,转子转速的偏移会释放其存储的动能,因此,当系统的供需不平衡量功率较小时,可以通过双馈异步风力发电机(DFIG)存储的转子动能在短时间内给系统注入额外的功率。在 t 时刻风速 v_w 下,DFIG可释放的能量 E_t^{FBR} 为^[11]:

$$\begin{aligned} E_t^{\text{FBR}} = & \left(\frac{\eta}{12} K v_w^2 \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \Big|_{t=t_{\text{del}}} - J \frac{\omega(0)}{\omega_s^2} T_{\text{del}} \right) \Delta \omega + \\ & \left(\frac{\eta}{36} K v_w^2 \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \Big|_{t=t_{\text{del}}} + \frac{\eta}{216} K v_w^2 \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \Big|_{t=t_{\text{del}}} - \right. \\ & \left. \frac{J}{2\omega_s^2} T_{\text{del}} \right) (\Delta \omega)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $K = \frac{1}{2} \rho \pi R^2$; η 为能量效率; J 为风机转动惯量; ω_s 为转子转速额定值; t_{del} 为能量输入的时刻; T_{del} 为能量输入时间段; $\Delta \omega$ 为超速控制下转子转速偏差; $\omega(0)$ 为初始状态下转子转速。

在正常情况下,风机运行于MPPT模式,此时有

$$\frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \Big|_{t=t_{\text{del}}} = 0, \frac{\partial^2 C_P}{\partial \lambda^2} \Big|_{t=t_{\text{del}}} < 0, \text{因此风机可注入的灵活性}$$

能量 $E_{i,t+1}^{\text{VFBR}}$ 估计值简化为:

$$E_{i,t+1}^{\text{VFBR}} = J \frac{\omega(0)}{\omega_s^2} T_{\text{del}} \Delta \omega + \frac{J}{2\omega_s^2} T_{\text{del}} (\Delta \omega)^2 \quad (12)$$

该表达式显示了可额外释放的虚拟灵活性能量 $E_{i,t+1}^{\text{VFBR}}$ 、能量输入时间段 T_{del} 以及超速控制下转子转速偏差 $\Delta \omega$ 之间的关系。

由于一般风机的风速和负荷预测存在误差,因此保守估计风机在式(12)下对应的灵活性储备功率 $\Delta P_{\text{VFBR}}^{+,-}$ 近似值为:

$$\Delta P_{\text{VFBR}}^{+,-} = K_{\text{del}} \Delta C_P(\Delta \lambda) \approx \frac{1}{2} \frac{E_{i,t+1}^{\text{VFBR}} (\Delta \omega^{\max}, T_{\text{del}})}{T_{\text{del}}} \quad (13)$$

其中, $\Delta \omega^{\max}$ 为超速控制下的最大转子转速偏差。

对于常规电源提供的能量,根据灵活性供给与需求,在计及风速和负荷预测误差的冗余下,上、下调灵活性储备 ΔP_{VFBR}^+ 、 ΔP_{VFBR}^- 分别为:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{VFBR}}^+ = \Delta L_s^+ + \alpha^+ L_s + \alpha_s L_s + \beta_w^+ P_{w,t+1} \\ \Delta P_{\text{VFBR}}^- = \Delta L_s^- + \alpha^- L_s + \beta_w^- (P_{w,\max} - P_{w,t+1}) \end{cases} \quad (14)$$

其中, ΔL_s^+ 、 ΔL_s^- 分别为负荷的上、下波动; L_s 为 $t+1$ 时刻的负荷; α^+ 、 α^- 分别为负荷误差下灵活性上、下调需求; α_s 为机组故障关机需求; β_w^+ 、 β_w^- 分别为风速误差下灵活性上、下调需求; $P_{w,t+1}$ 为风机在 $t+1$ 时刻的出力; $P_{w,\max}$ 为风机最大出力。

因此,常规能源提供的灵活性能量 $E_{i,t+1}^{\text{RFBR}}$ 为:

$$E_{i,t+1}^{\text{RFBR}} = \Delta P_{\text{VFBR}}^{+,-} T_{\text{del}} \quad (15)$$

通过上述VFBR模型计算出在不同风速 v_w 下DFIG所能提供的灵活性储备,并将得到的数值保存在查找表中。在实时优化阶段,通过在不同风速下在线选择查找表中对应的灵活性储备数值来确定DFIG减载率,修正风机功率基准值。

通过转子转速的削减释放其存储的动能,在转子侧控制器参数上修改有功功率参考值 ΔP_{ref} 来修正注入信号,控制框图如图5所示。图中, $P_{\text{ref}}^{\text{new}}$ 为结合虚拟惯量控制、超速控制和下垂控制的DFIG基准功率^[14]; P_{ref} 为结合虚拟惯量控制和下垂控制的DFIG有功参考值; T 为时间常数,取0.1 s; K_{in} 、 K_{d} 分别为虚拟惯量控制和下垂控制的控制参数,在负荷扰动时分别产生额外的有功 ΔP_{in} 、 ΔP_{d} 帮助降低功率缺额; f_{meas} 为所测得的频率值; f_{ref} 为基准频率。

结合(8)、(9)可根据所需的灵活性储备确定减载率:

$$\Delta P_{\text{VFBR}}^{+,-} = K_{\text{del}} C_{P_{\max}} d \quad (16)$$

2.3 需求响应负荷灵活性电池储备模型

鉴于需求响应技术可使白天高峰负荷向夜间转移,改善负荷的功率需求曲线,同时在时间尺度上也

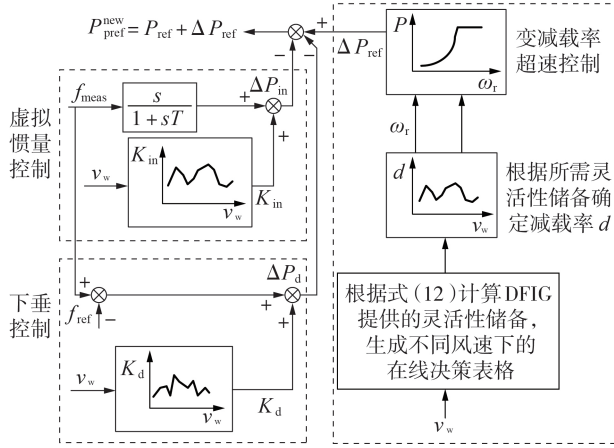


图 5 考虑灵活性储备的DFIG超速控制策略

Fig.5 Overspeed control strategy of DFIG considering flexible reserve

能够与风电出力曲线匹配,减轻弃风所造成的经济损失,因此本文研究的负荷备用都是基于需求响应技术的负荷。通过聚合商收集愿意参与响应的用户群,根据电力市场竞争价及电力公司日前调度决策制定方案。

对于第*i*个微电网的聚合商,灵活性负荷的功率消耗的需求可以表示为:

$$E_{i,t}^{F,D} = E_{i,t-1}^{F,D} + (A_{i,t} - P_{i,t}^{D,F})\Delta t \quad (17)$$

其中, $E_{i,t}^{F,D}$ 、 $E_{i,t-1}^{F,D}$ 分别为第*i*个微电网中灵活性负荷在*t*时刻和*t-1*时刻提供的灵活能量; $A_{i,t}$ 为在*t*时刻第*i*个微电网未加需求响应时的正常负荷消耗; $P_{i,t}^{D,F}$ 为在*t*时刻第*i*个微电网中灵活性负荷通过需求响应激励改变后的功率消耗。

3 多微电网分布式功率分配技术

3.1 分布式算法图论基础

对于基于多智能体架构的多微电网系统,其通信架构可以由无向图 $G=(V,E)$ 表示。其中, $V=\{1,2,\dots,N\}$ 为有向图 G 的节点集,其为一组有限的非空元素集; $E\subseteq V\times V$ 为有向图 G 的边集。当且仅当节点*i*与节点*j*之间存在通信信道时,称这2个连接的节点为“邻居”。定义矩阵 A 为邻接矩阵, D 为度矩阵, L 为拉普拉斯矩阵。邻接矩阵 A 的对角线元素为0,非对角线元素 a_{ij} 是从节点*i*到节点*j*的边的数量。度矩阵 $D=(D(V_i))$ 为一个 $N\times N$ 阶的对角矩阵,其对角线元素为每个顶点的度数, V_i 表示*V*中节点*i*。拉普拉斯矩阵定义为 $L=D-A$,其反映了图论中的动态特性。

3.2 多微电网分布式功率分配

为了量化每个微电网所能提供的灵活性功率,结合上述灵活性电池储备模型,本文定义每个微电网的可用灵活性储备UFR(Utilizable Flexible Reserve)作为协调各微电网功率分配的指标。通过

对可用灵活性储备的定量分析,在日前调度规划阶段向调度部门传递实际可用的灵活性功率,当整个系统负荷发生波动时,多个微电网区域根据对可用灵活性功率的合理协调分配来弥补由于源荷不确定所造成的功率不平衡。因此,本文设计将每个微电网的可用灵活性储备作为一致性变量,定义为:

$$\lambda_i^{\text{UFR}} = \frac{E_{i,t+1}^{\text{FBR}}}{E_{MG_i}^{\text{FBR}}} \quad (18)$$

其中, λ_i^{UFR} 为第*i*个微电网可用的灵活性储备。通过可用灵活性储备使得灵活性储备容量大的微电网承担更多的源荷不确定性波动,更好地利用微电网中可调控灵活性资源。

对于节点*i*的一致性状态信息,其一阶动态特性可表示为:

$$\dot{\lambda}_i^{\text{UFR}} = -\sum_{j=1}^N a_{ij}(\lambda_i^{\text{UFR}} - \lambda_j^{\text{UFR}}) \quad (19)$$

当测量信息持续可用时,一致性网络可以用连续的时间模型进行动态描述。但是由于实际电力系统的采样和数据传输存在特定的延时且通信网络中的数据都是离散的,因此为了更好地分析一致性的动态特性,使用离散一致性算法来描述网络的动态特性^[17-18]。离散一致性算法表示为:

$$\lambda_i^{\text{UFR}}(k+1) = \sum_{j=1}^N h_{ij} \lambda_j^{\text{UFR}}(k) \quad (20)$$

其中, k 为离散时间序列; h_{ij} 为状态转移矩阵 H 中的第*i*行第*j*列元素,其可以表示为式(21)。

$$h_{ij} = \frac{h_{ij} |l_{ij}(k)|}{\sum_{j=1}^N z_{ij} |l_{ij}(k)|} \quad (21)$$

其中, l_{ij} 为拉普拉斯矩阵 L 中的第*i*行第*j*列元素; z_{ij} 为不同的拉普拉斯矩阵进行邻近节点迭代所赋予的权重系数,表示节点*i*到节点*j*的增益权重,权重的选取可根据实际情况进行优化设计,从而提高一致性算法的收敛速度,本文简化设置权重 $z_{ij}=1$ 。

3.3 计及灵活性储备的多微电网分布式协调调控策略

根据本文建立的灵活性电池储备模型,对含有分布式风机的多微电网系统进行可调用灵活性功率的协调优化,根据时间尺度分为日前调度规划、日内重新调整和实时优化运行3个阶段。其中日前调度规划阶段由微电网下层管理智能体执行,日内重新调整阶段由微电网上层全局优化智能体决定,实时优化运行阶段由微电网上层局部优化智能体实施。附录A图A1为所提策略的流程图,各阶段的功能主要如下。

1) 日前调度规划阶段。通过微电网下层管理智能体对单个区域微电网中所有可调控灵活性资源进

行整合与评估。根据式(12)评估VFBR,根据式(15)评估RFBR,结合式(12)与式(15)确定第*i*个微电网的灵活性电池储备模型的参数 $E_{MG_i}^{FBR}$ 。

2)日内重新调整阶段。由于可以将风电功率波动以及负荷的变化特性理解为一个随机的过程,在日前调度规划阶段获取 $E_{MG_i}^{FBR}$ 的基础上,根据需求响应的负荷变化数据,运用分布式一致性算法对式(18)进行求解,对各微电网分布式单元承担的负荷变化量进行重新分配。该阶段由微电网上层全局优化智能体执行并在一天中更新数次,本文选取1h为时间间隔,每日进行24次调整。

3)实时优化运行阶段。微电网上层局部优化智能体根据日内重新安排的结果进行该阶段内的实时优化运行。其中实时功率的不平衡可能是由负荷和间歇性发电机的连续变化、预测误差或常规能源发电机在计划外的启停以及在运行点的爬坡率不协调所造成的。

4 仿真分析

4.1 日前调度规划

本文在MATLAB R2018a中对图1所示的多微电网系统进行灵活性评估测试。其中单个微电网由分布式风机、常规能源分布式电源、储能单元以及可控负荷组成,微电网分布式单元的详细控制参数见文献[15],DFIG采用可变减载率超速控制,其出力及各微电网中负荷选取华东某地区的实际数据。由于一般风机在晚上出力较多,为了充分利用负荷参与系统功率平衡的灵活性调控潜力,将需求响应下的负荷功率曲线作为本文中各微电网所应承担的负荷量,根据1.2分析可得各微电网灵活性储备容量如附录A图A2所示,各微电网系统调频控制主要参数如附录A表A1所示,各微电网承担的负荷如附录A图A3所示。

微电网下层管理智能体根据式(12)可得到风机在不同风速下所能提供的灵活性储备。基于灵活性电池储备模型对微电网灵活性进行评估,得到参数如图6所示。

从图6(a)可以看出:当不考虑风机的VFBR模型时, MG_i 的最大出力为 G_{max} ,最小出力为 G_{min} , MG_i 的出力调节范围如图中虚线阴影部分所示,在采用需求响应技术后负荷曲线由原先的原始负荷变为 L_{de} ; L_{min} 、 L_{max} 、 L_{av} 分别为 MG_i 的最小负荷承担量、最大负荷承担量和平均负荷承担量;在部分时间段内曲线 L_{de} 不在 G_{max} 与 G_{min} 形成的功率包络线范围内,无法实现源-荷动态功率平衡,然而需求响应技术使源-荷之间的功率缺额不是很大,同时通过市场激励的方式使白天高峰负荷向夜间转移,改善了负荷的功率需求曲线,使其在时间尺度上也能够与风电出力

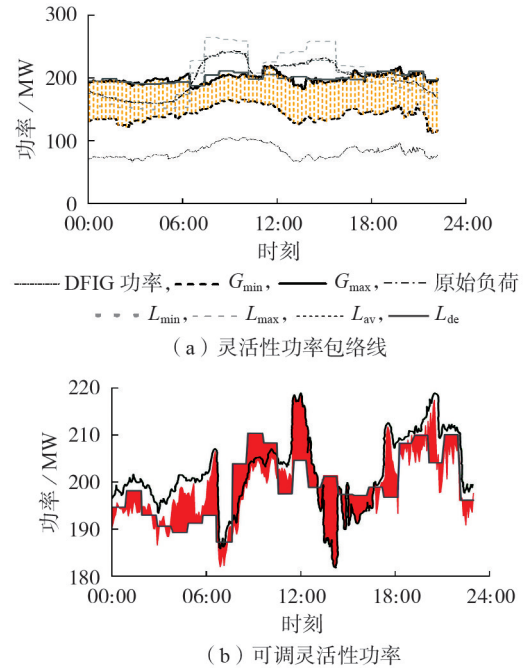


图6 灵活性电池储备模型灵活性评估

Fig.6 Flexibility evaluation of flexible battery reserve model

曲线匹配,从而减轻了弃风所造成的经济损失,因此在后续日内调整阶段,各微电网所承担的负荷都是基于需求响应技术的负荷。本文将 G_{max} 与 L_{de} 的功率不平衡曲线表示为可调灵活性功率。图6(b)中,源-荷间功率缺额如图中阴影部分面积所示。当考虑风机的VFBR模型时,根据虚拟灵活性电池模型估计的DFIG可调备用容量为 P_{FBR}^+ ,此时新的风机最大出力 $G'_{max} = P_{FBR}^+ + G_{max}$,在大部分时间段内 MG_i 的 L_{de} 都在新的最大出力 G'_{max} 功率包络线范围内,甚至在00:00—06:00、19:00—24:00间可以实现完全的源-荷动态平衡,这是由于在这些时间段内一般风速较大,分布式风机的出力越大,超速控制所能提供的备用容量也越多,结合负荷侧需求响应技术的应用可以更好地促进风能的消纳。附录A图A2给出了灵活性电池储备模型下风机所能提供的虚拟灵活性储备和各微电网提供的总的灵活性储备容量。

4.2 日内重新调整

为了实现分布式架构下各微电网间灵活性资源的协调优化,运用一致性算法求解多微电网系统的可调用灵活性功率。本文以1h为时间间隔估算各微电网的负荷承担量,微电网上层全局优化智能体根据可用灵活性储备指标安排各微电网分布式单元所应承担的负荷需求变化量。根据各微电网可调用灵活性功率比率所得的一致性变量变化如图7(a)所示,由图可见,当负荷需求量发生变化时,各微电网可调用灵活性功率比率仍然可以收敛到新的最优可调用灵活性功率比率,图7(b)为此时4个微电网的

负荷承担量。分析图 7(b)可知,虽然每个时间段总的负荷需求会发生变化,但是通过分布式一致性算法对式(18)求解可以快速得到各微电网的功率分配方案,为了充分发挥各个微电网的灵活性资源调控潜力,将微电网中日前调度规划阶段下微电网下层管理智能体计算得到的灵活性储备容量值作为灵活性可调用功率指标,在应对总的负荷需求变化时,使灵活性储备容量大的微电网承担更多的负荷变化量,灵活性储备容量小的微电网承担较小的负荷变化量,防止灵活性储备小的微电网运行在最大出力状态而需从外电网购买更贵的电量,实现多微电网内灵活性资源的协调优化。

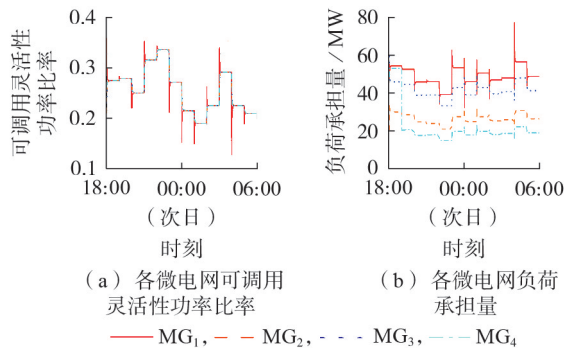


图 7 多微电网可调用灵活性功率

Fig.7 Dispatchable flexible power of multi-microgrid

为验证所提调控方案的经济性,对不含 VFBR (Case 1)和含有 VFBR (Case 2)这 2 种场景进行比较。本文假设当微电网内部无法实现供需功率平衡时,向外网的购电成本为 0.5 元/kW,向微电网内部灵活性资源的购电成本为 0.25 元/kW^[6],其经济性如表 1 所示。分析表 1 可知,当不采用 VFBR 模型时,一天中会有 486 MW 的负荷在灵活性包络线范围外,微电网中无法实现功率平衡,因此需要向外部电网购电。当采用由 RFBR+VFBR 共同组成的灵活性电池储备模型时,微电网中只有 174 MW 负荷无法实现功率平衡,而剩下的 312 MW 负荷在采用变减载率的风机提供的备用容量与需求响应负荷的共同作用下实现了功率平衡,VFBR 的储备容量可通过辅助服务的方式实现,其成本比从外部电网购电要低,因此具有更好的经济性。

表 1 不同场景下的经济性分析

Table 1 Economic analysis under different cases

场景	FBR	购电量 / MW	成本 / 万元
Case 1	RFBR	486(外网)	24.3
Case 2	RFBR+VFBR	174(外网)+312	15.0

需要注意的是,由于本文采用的是分布式算法,因此对多微电网系统具有“即插即用”的优点。“即插即用”下多微电网可调用灵活性功率如附录 A 图 A4 所示,设置 23:00 至次日 01:00 期间,MG₂ 由于外界

原因退出运行,此时 MG₂ 的可调用灵活性功率比率变为 0,其余 3 个微电网共同承担 MG₂ 的负荷变化,同时可调用灵活性功率比率重新收敛到一个新的最优值。当在 01:00—04:00 时,MG₂ 重新回到系统中,由其余 3 个微电网所承担的全部负荷量重新变为 4 个微电网共同分担。由于以分布式新能源组成的微电网有较强的不确定性,因此本文采用该分布式算法可以很好地应付这种由外界因素导致的微电网“即插即用”的不确定性。

4.3 实时优化运行

为了验证可变减载率超速控制方法的有效性,下面通过仿真对比固定 10% 减载率、考虑灵活性储备的可变减载率及未加超速控制 3 种方法下微电网频率及有功功率的变化,相应的微电网频率、DFIG 有功功率以及减载率取值如图 8 所示。从图 8(a)可知,在 45 s 发生负荷扰动时,可变减载率控制下的微电网动态频率偏差远小于固定减载率。由图 8(b)可知,可变减载率控制下 DFIG 输出的有功功率稍低于固定减载率,这部分有功功率为 DFIG 参与微电网频率控制提供了更多的备用容量,同时增大减载率相当于提高转子转速,释放更多的转子动能。通过灵活调控风机转子侧隐藏的动能可以更好地实现源-荷间的实时功率平衡,提高系统动态调频能力。

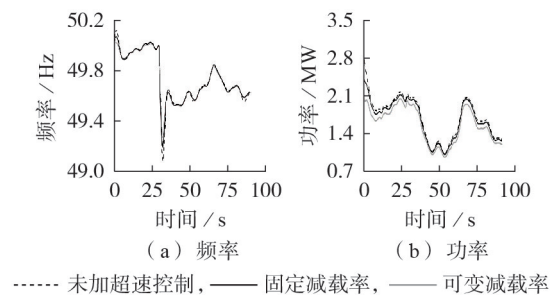


图 8 基于可变减载率超速控制的调频效应

Fig.8 Frequency regulation effect based on variable load shedding ratio overspeed control

5 结论

本文通过结合灵活性储备的概念提出灵活性电池储备模型,以评估在分布式架构下多微电网系统的灵活性可调用功率能力。相较于传统关于灵活性的研究,本文没有简单地将风机和负荷作为不可调控资源,而是通过 VFBR 模型定量分析风机在超速控制下所能提供的备用容量和调频潜能。在发生源-荷侧功率波动时,基于设计一致性算法对分布式架构下各微电网的灵活性可调节功率进行协调分配,实现多微电网系统在源-荷随机波动下的动态功率平衡与灵活性资源的协调优化。通过仿真算例可以得到如下结论。

1) 本文定义的灵活性电池模型可以很好地评估

分布式架构下系统的可调用灵活性功率能力。对于调度层而言,只需处理一批“电池”即可了解该区域的可调用灵活性功率潜力。

2)提出将可用灵活性功率作为一致性变量,使得灵活性储备大的微电网承担更多的动态功率调节量,充分挖掘多微电网灵活性资源间协调优化潜力,在保障风电消纳的同时规避了微电网向外购电的需求,提高了系统的经济性。

3)采用可变减载率超速控制方法设置风机出力,使其留有一定的备用容量,挖掘风机的灵活性调控潜力。在此情况下,可以将风机视为具有一定可控性的单元,更好地实现功率的灵活性动态平衡。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

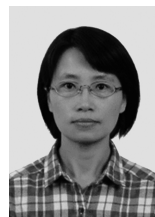
参考文献:

- [1] MOHANDÉS B, MOURSÍ M S E, HATZÍARGYRIOU N, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4):3140-3155.
- [2] WU Y W, LIM G J, SHI J. Stability-constrained microgrid operation scheduling incorporating frequency control reserve[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2):1007-1017.
- [3] NOSAIR H, BOUFFARD F. Reconstructing operating reserve: flexibility for sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4):1624-1637.
- [4] KHATAMI R, PARVANIA M, NARAYAN A. Flexibility reserve in power systems: definition and stochastic multi-fidelity optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1):644-654.
- [5] 吴界辰, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及不确定因素的需求侧灵活性资源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14):73-80, 89. WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Optimal dispatch of flexible resource on demand side considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14):73-80, 89.
- [6] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13):147-158. LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):147-158.
- [7] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):9-20. LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):9-20.
- [8] 李海波, 鲁宗相, 乔颖. 源荷储一体化的广义灵活电源双层统筹规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21):46-54, 104. LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying. Bi-level optimal planning of generation-load-storage integrated generalized flexibility resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21):46-54, 104.
- [9] HEUSSEN K, KOCH S, ULBIG A, et al. Energy storage in power system operation: the power nodes modeling framework [C]//2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). Gothenberg, Sweden: IEEE,

2010:1-8.

- [10] HEUSSEN K, KOCH S, ULBIG A, et al. Unified system-level modeling of intermittent renewable energy sources and energy storage for power system operation[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1):140-151.
- [11] WANG S Q, TOMSOVIC K. A novel active power control framework for wind turbine generators to improve frequency response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6579-6589.
- [12] KEUNG P K, LI P, BANAKAR H, et al. Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1):279-287.
- [13] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9):2385-2391. DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control[J]. Power System Technology, 2015, 39(9):2385-2391.
- [14] 边晓燕, 印良云, 丁炆, 等. 基于深度信念网络的低风速风电参与微电网频率优化控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6):76-82. BIAN Xiaoyan, YIN Liangyun, DING Yang, et al. Frequency optimization control of microgrid with LWTGs based on deep belief network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):76-82.
- [15] 姜莹, 边晓燕, 李东东, 等. 基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(9):118-124. JIANG Ying, BIAN Xiaoyan, LI Dongdong, et al. Research on doubly fed induction generator participation in microgrid frequency modulation based on variable load shedding ratio over-speed control[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(9):118-124.
- [16] BUI V H, HUSSAIN A, KIM H M. A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):1323-1333.
- [17] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17):4397-4407. LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):4397-4407.
- [18] 乐健, 周谦, 赵联港, 等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3):44-54. LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):44-54.

作者简介:



边晓燕

边晓燕(1976—),女,上海人,教授,博士,主要研究方向为新能源并网、电力系统稳定与控制、柔性交流输电系统(E-mail: kuliz@163.com);

孙明琦(1994—),男,上海人,硕士,主要研究方向为主动配电网分布式协同调度、弹性电网(E-mail: schroambition@163.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第104页 continued on page 104)

Springer, 1986: 115-128.

- [15] BERTSIMAS D, DOAN X V, NATARAJAN K, et al. Models for minimax stochastic linear optimization problems with risk aversion[J]. *Mathematics of Operations Research*, 2010, 35(3): 580-602.
- [16] SHAPIRO A. On duality theory of conic linear problems [M]//*Nonconvex Optimization and Its Applications*. Boston, MA, USA: Springer US, 2001: 135-165.
- [17] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, et al. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. *IEEE Transactions on power systems*, 1999, 14(3): 1010-1020.
- [18] 李运龙. 系统测试数据[EB/OL]. [2020-07-20]. <https://github.com/liyl-github/testdata2020C3.git>.

作者简介:



李运龙

度与运行决策。

李运龙(1996—),男,广西玉林人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与优化调度(E-mail: eplyl18@scut.edu.cn);

李志刚(1988—),男,广东广州人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与优化调度(E-mail: lizg16@scut.edu.cn);

郑杰辉(1990—),男,广东茂名,人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统优化调

(编辑 王锦秀)

Distributionally robust economic dispatch of multi-regional power grid considering uncertainty and correlation of wind power

LI Yunlong, LI Zhigang, ZHENG Jiehui

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The current moment based distributionally robust optimization method does not properly consider the correlation among uncertain parameters of wind power, which causes conservativeness of the method. Considering the uncertainty and correlation of wind power, the principal component analysis method is used to build a dimensionality reduced ambiguity set of moment based distributionally robust economic dispatch model for multi-regional power grid. The original model is transformed into a semidefinite programming model, and solved by the delayed constraint generation algorithm. The simulative results of case show that the proposed method can improve calculation efficiency and reduce power grid cost.

Key words: multi-regional economic dispatch; distributionally robust optimization; uncertainty; correlation; principal component analysis

(上接第54页 continued from page 54)

Distributed coordinated dispatch and control strategy of multi-microgrid system with wind power considering flexibility reserve

BIAN Xiaoyan¹, SUN Mingqi¹, XU Jiayu², WANG Xiaoyu¹, LI Guoqing³, LI Dongdong¹

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315020, China;

3. Power Dispatch and Control Center of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China)

Abstract: The access of high proportion of wind power and application of demand response technology make high requirements for dynamic balance of active power of multi-microgrid system under distributed architecture, it is necessary to fully use flexible resources for system coordinated dispatch and control. A novel flexible battery reserve model is proposed to evaluate the flexible reserve power of multi-microgrid system, and a virtual flexible battery reserve model is defined to evaluate wind farm reserve and demand response load reserve, and fully exploit their potential capacity of frequency regulation. On this basis, the power allocation of each microgrid under this model is solved based on the consensus algorithm, and a distributed coordinated dispatch and control strategy of multi-microgrid system with wind power is proposed considering the flexible reserve, which realizes coordinated optimization of flexible resources under distributed architecture. The effectiveness of the proposed strategy is verified by the actual data of a certain region in East China. Case results show that the coordinated optimization of source-load flexible reserve resource realizes the dynamic power balance of the system under distributed architecture while guarantees wind power consumption.

Key words: flexible battery reserve model; multi-microgrid; consensus algorithm; source-load coordination; variable load shedding ratio

附录 A:

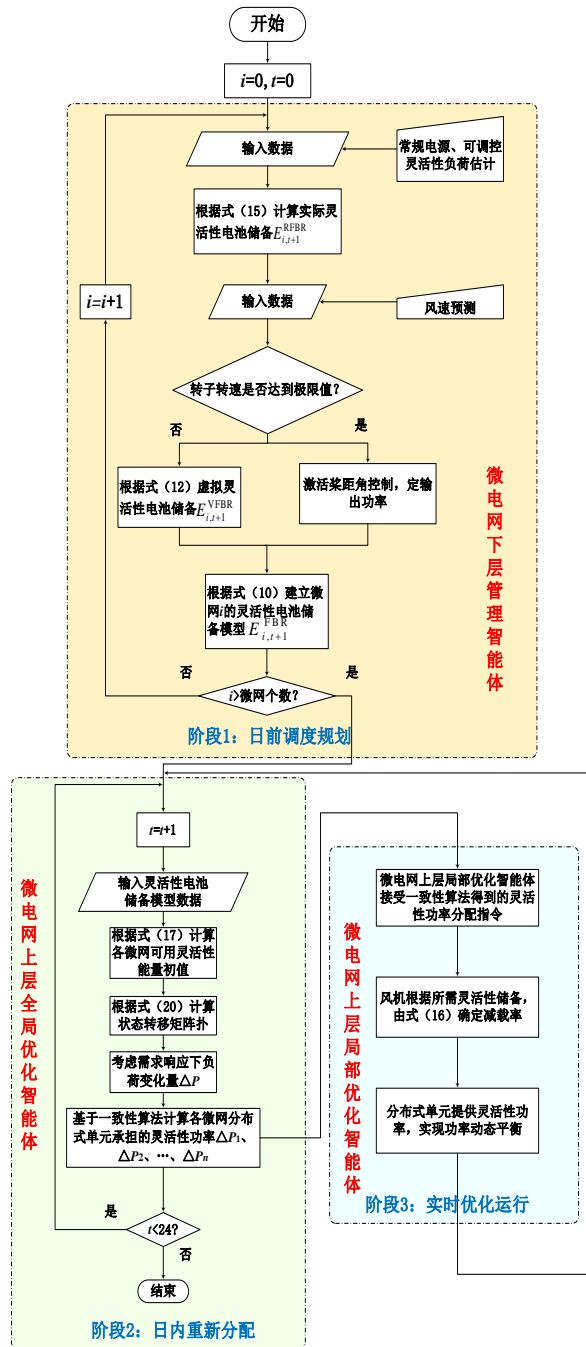
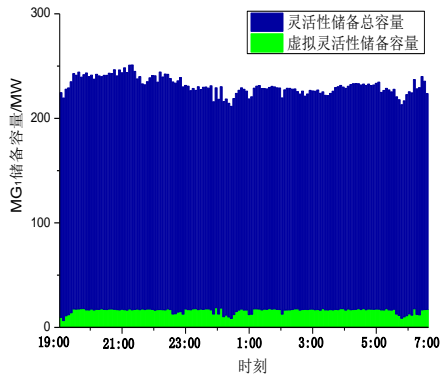
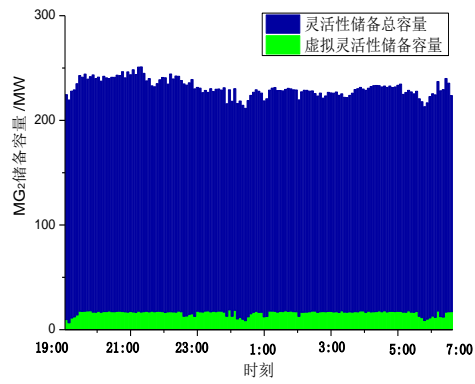


图 A1 多微电网分布式协调调控流程图

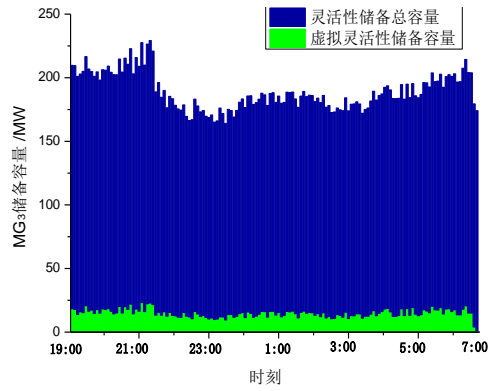
Fig.A1 Flowchart of distributed coordinated dispatch and control for multi-microgrid



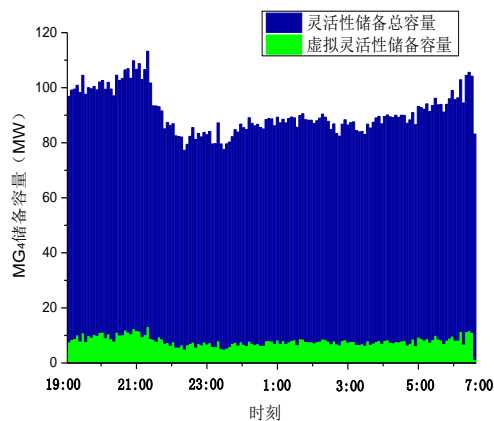
(a) MG₁



(b) MG₂



(c) MG₃



(d) MG₁

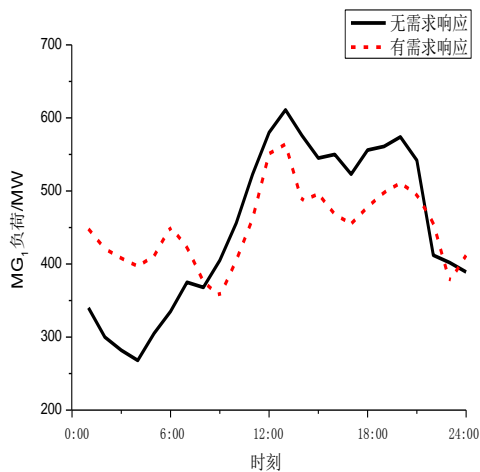
图 A2 各微电网灵活性储备容量

Fig.A2 Flexibility reserve capacity of each microgrid

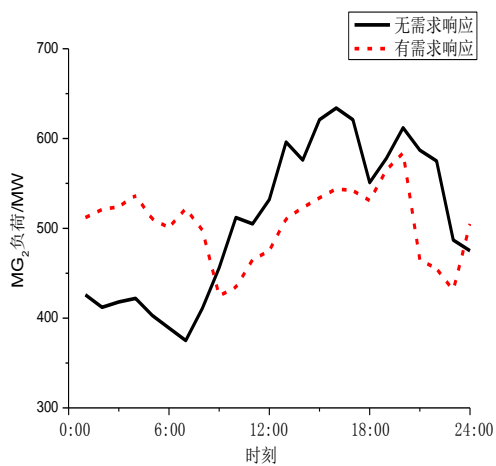
表 A1 各微电网系统调频控制主要参数

Table A1 Main parameters of frequency control for each microgrid system

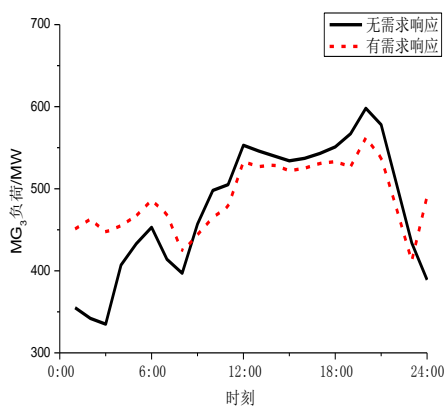
微电网	同步机惯性时间常数 H/s	同步机调差系数 R	DFIG 惯性时间常数 H_f/s	DFIG 虚拟惯量控制系数 K_1
1	5	0.05	4.0	4.0
2	5	0.05	3.5	3.5
3	5	0.05	3.5	3.5
4	5	0.05	4.0	4.0



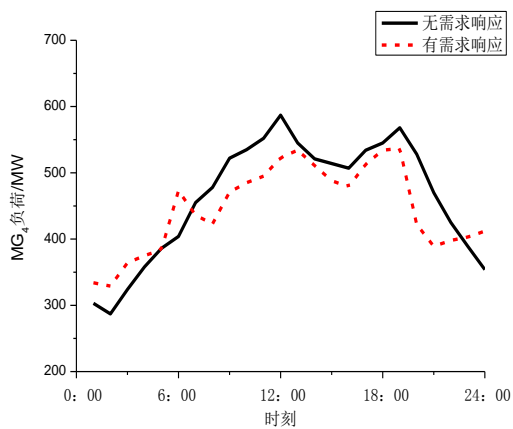
(a) MG₁



(b) MG₂



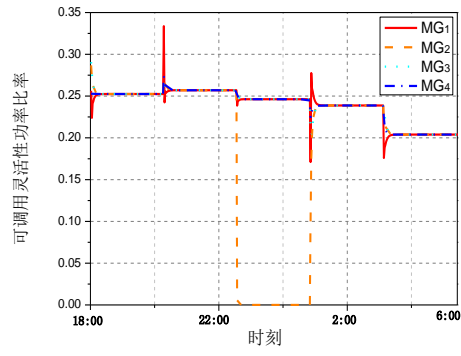
(c) MG₃



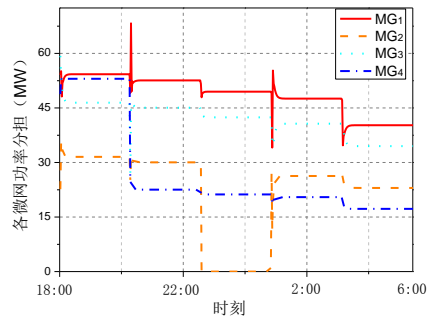
(d) MG₄

图 A3 各微电网负荷功率

Fig.A3 Load power of each microgrid



(a) 各微网可调用灵活性功率比率



(b) 各微网负荷承担量

图 A4 “即插即用” 下多微电网可调用灵活性功率

Fig.A4 Dispatchable flexible power of multi-microgrid considering “plug and play”