

# 计及辅助服务的微电网源荷协同调频优化控制策略

楼佩婕<sup>1</sup>,边晓燕<sup>1</sup>,崔勇<sup>2</sup>,王小宇<sup>1</sup>,林顺富<sup>1</sup>,赵耀<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学 电气工程学院,上海 200090;2. 国网上海市电力公司,上海 200122)

**摘要:**针对含高比例新能源微电网中调频资源缺乏且源荷参与调频意愿较低而导致的系统频率稳定性下降问题,通过辅助服务机制激励风电机组与可控负荷提供调频辅助服务,提出一种计及综合经济效益最优的源荷协同调频优化控制策略。该策略根据双馈异步风电机组调频、可控负荷一次调频、柴油机惯量调频以及一次调频计算提供辅助服务的效益和成本,综合考虑微电网的调频经济效益及调频效果,利用深度信念网络优化双馈异步风电机组的减载率、虚拟惯量、下垂控制及可控负荷的控制参数,实现双馈异步风电机组、可控负荷及柴油机多时间尺度的协同调频。通过搭建高比例新能源微电网模型仿真验证了源荷协同调频优化控制策略的有效性,使源荷提供辅助服务后能获得最优经济效益以及较好的调频效果,可有效挖掘源荷提供调频辅助服务的能力。

**关键词:**高比例新能源;微电网;辅助服务;源荷协同控制;调频控制;经济效益;深度信念网络

**中图分类号:**TM 727;TM 761

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202109018

## 0 引言

近年来,随着微电网的大力发展,传统化石能源被可再生能源大量替代。微电网中新能源渗透率不断提高,导致传统调频资源稀缺,系统的有效转动惯量过低,且现有的辅助服务机制并不能很好地激励其他灵活性资源提供调频辅助服务<sup>[1]</sup>,造成微电网的频率稳定性下降,传统发电机组的调频负担加重,同时也制约了系统对新能源的消纳能力<sup>[2]</sup>。在微电网脱离大电网切换成孤岛状态运行后,频率稳定性将受到更大威胁。当风力发电在微电网中的占比越来越高时,风电主动参与调频辅助服务是系统确保自身安全的必然选择。并且随着智能电网的发展,空调、冰箱、电动汽车等可控负荷具备提供辅助服务的巨大潜力,可以提高系统的可靠性、灵活性<sup>[3]</sup>。因此,通过激励源荷提供调频辅助服务可以有效解决上述问题,维护微电网的频率稳定。

国外辅助服务市场发展早,较为成熟,在爱尔兰的安全可持续电力系统 DS3 (Delivering a Secure, Sustainable Electricity System) 标准中,源侧的惯量及虚拟惯量调频已成为一项辅助服务。文献[4-5]对辅助服务问题进行了广泛研究,分析了各地区的辅助服务市场发展历程、辅助服务产品种类以及定

价机制、市场机制等。目前大电网的辅助服务市场在国外很多国家已经形成较为稳定的模式,而关于微电网辅助服务市场的研究较少。需求响应作为辅助服务中的一项,诸多国内外学者利用需求响应来增强微电网处于孤岛运行状态时的稳定性。文献[6]为了提高孤岛运行状态下微电网的供电可靠性,提出了计及激励型需求响应的微电网负荷削减策略;文献[7]提出了一个提供辅助服务的市场框架,并为孤岛微电网中的聚合商们建立了需求响应市场,以调节孤岛微电网的频率;文献[8]引入频率控制备用辅助服务,当微电网处于孤岛运行状态时向微电网内部购买该辅助服务,以此确保高效、经济和可靠的微电网运行。因此,在处于孤岛运行状态的微电网中实施辅助服务具有可行性和必要性,亟需建立合理的辅助服务市场机制以提高各市场主体提供辅助服务的积极性。

在源荷协同调频的控制方法方面,国内外学者开展了一定的研究。文献[9]为了充分利用负荷侧备用资源,提出了一种计及网络安全性约束的源荷协同频率控制策略,通过量化分析负荷控制对支路功率的影响,辨别出对系统安全性不利的负荷节点,避免其参与频率控制;文献[10]提出了一种基于集体智慧的集成学习算法,实现孤岛微电网中分布式电源与负荷的协同频率控制,有效解决了源荷协同频率控制下的“维数灾难”问题;文献[11]提出了一种电源、电网和负荷共同参与的源-网-荷系统频率调节的复合控制策略,解决了源荷协同频率调节问题。但上述的源荷协同调频策略仅从控制层面出发,没有进一步考虑调频效益及成本。基于此,文献[2]提出了一种源荷协同辅助服务理念及市场框架,并分析了电动汽车与火电机组协同参与调频辅助服

收稿日期:2020-10-21;修回日期:2021-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977127);上海市科学技术委员会资助项目(19020500800);上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“晨光计划”(17CG56)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977127),the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality(19020500800) and “Chenguang Program” of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission(17CG56)

务的经济性,但没有考虑源荷总的调频经济效益;文献[12]提出了一种综合考虑电源虚拟同步机发电成本及负荷虚拟同步机用电收益的虚拟同步化微电网二次调频策略,实现计及综合运行成本的频率最优调节,但该策略未考虑辅助服务市场的结算价格。

综上所述,现有的频率控制策略没有考虑源荷参与调频辅助服务市场后的综合经济效益最优,无法在高比例新能源微电网中激励源荷提供调频辅助服务。为此,本文提出一种高比例新能源微电网中计及辅助服务的源荷协同辅助调频优化控制策略。由柴油机、双馈异步风电机组 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator wind turbine)以及可控负荷共同承担微电网的频率控制,通过辅助服务价格机制激励源荷提供调频辅助服务;根据源荷参与系统调频的效益和成本,计算微电网综合经济效益;综合考虑微电网的经济效益及调频效果,利用深度信念网络(DBN)预测不同控制参数、不同减载率下系统的经济效益以及综合调频指标,实现减载率与多种控制参数的优化。该策略能够实现微电网综合效益最优,通过建立源荷协同调频辅助服务机制来解决传统高比例新能源微电网中调频资源缺乏以及源荷调频积极性低的问题,缓解微电网在孤岛运行状态下的调频压力。最后,在孤岛微电网中进行仿真,验证了所提控制策略对经济效益及调频效果的改善作用。

## 1 DFIG 及可控负荷调频控制

### 1.1 DFIG 调频控制

DFIG 参与调频控制主要分为基于转子动能的虚拟惯性控制、下垂控制和超速减载控制<sup>[2]</sup>。

传统 DFIG 由于发电系统与电网的解耦控制,无法响应系统频率变化<sup>[13]</sup>,为使 DFIG 在系统频率波动时更好地辅助调频,增强抑制频率波动和减小频率差的能力,将虚拟惯性控制环节、下垂控制环节与超速减载控制环节共同引入风电机组,综合控制框图见附录 A 图 A1。

虚拟惯量控制在频率跌落后的 0~2 s 内便开始作用,响应速度快,可有效抑制频率变化率,减慢频率下降的速度<sup>[14]</sup>,虚拟惯量作用效果见附录 A 图 A2。加入虚拟惯量控制后,转子侧变流器有功功率的参考值修正量  $\Delta P_{in}$  为:

$$\Delta P_{in} = K_{in} \frac{df}{dt} \quad (1)$$

式中:  $K_{in}$  为虚拟惯量参数;  $f$  为系统频率;  $t$  为时间。

下垂控制将频率偏差  $\Delta f$  作为控制环节的输入,其能在频率最低点附近提供功率支撑,有效减小稳态频率偏差。加入下垂控制后,转子侧变流器有功功率的参考值修正量  $\Delta P_d$  为:

$$\Delta P_d = K_d \Delta f \quad (2)$$

式中:  $K_d$  为下垂控制参数。

超速减载控制可使 DFIG 偏离最大功率点跟踪(MPPT)曲线,运行在次优运行曲线,保证其具有调频备用容量,控制原理见附录 A 图 A3。超速减载控制与下垂控制及虚拟惯量控制相互配合,可维持 DFIG 输出功率的稳定性,保证微电网频率的快速恢复。超速减载预留的备用功率  $\Delta P_c$  为:

$$\Delta P_c = P_{opt} d \quad (3)$$

式中:  $P_{opt}$  为 MPPT 最优功率;  $d$  为风电机组减载率。

因此,DFIG 转子侧变流器输入有功参考值  $P_{ref}$  为:

$$P_{ref} = P'_{opt} - K_{in} \frac{df}{dt} - K_d \Delta f \quad (4)$$

式中:  $P'_{opt}$  为减载  $d$  后的次最优功率。

### 1.2 可控负荷一次调频控制

当微电网发生小扰动时,可控负荷可通过改变其设定温度来调整自身的运行状态,进而改变可控负荷的聚合功率,辅助微电网调节系统频率<sup>[15]</sup>。可控负荷一般包括空调、电冰箱、热水器等,本文只考虑制冷负荷参与辅助调频,所得结论可推广到其他可控负荷。

将微电网中参与辅助调频的可控负荷总体称为可控负荷聚合体,调节温度  $T$  为室内温度,随时间的变化规律见附录 A 图 A4。

系统频率发生跌落时,可将制冷负荷在制冷状态下的设定温度调高,从而降低输出功率,参与需求响应。高低温阈值变化如下:

$$\begin{cases} T'_+ = T_+ - \Delta T \\ T'_- = T_- - \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta T = p_f (f - f_N) \quad (6)$$

$$p_f = K_f |f - f_N| \quad (7)$$

式中:  $T_+$ 、 $T_-$  分别为可控负荷启动 / 停止的温度上、下限;  $T'_+$ 、 $T'_-$  分别为可响应系统频率变化的温控设备上、下限;  $\Delta T$  为温控负荷的上下限温度变化值;  $p_f$  为用户需求响应度,表示微电网频率变化每单位赫兹时可控负荷触发温度的变化量,单位为  $^{\circ}\text{C} / \text{Hz}$ ;  $f_N$  为系统基准频率;  $K_f$  为用户需求响应度系数,当  $K_f = 0$  时表示可控负荷不参与微电网辅助调频。

由式(6)、(7)可知,当  $K_f$  的取值一定时,频率偏差越大,  $p_f$  的值越大,可控负荷温度变化得越剧烈,调频效果越好,但是用户的满意度越低。

当系统频率降低时,  $\Delta T < 0$ , 可控负荷温度上、下限提高,可控负荷聚合体减少有功消耗量;当系统频率升高时,  $\Delta T > 0$ , 温度上、下限降低,可控负荷聚合体有功消耗量增加。当微电网频率偏离额定值时,可控负荷聚合体的有功消耗量  $P_{CL}$  为:

$$P_{CL} = \begin{cases} 0 & \Delta T < 0 \text{ 且 } |\Delta T| \geq T'_+ - T'_- \\ L_{on} \left( 1 + \frac{\Delta T}{T'_+ - T'_-} \right) P_N & \Delta T < 0 \text{ 且 } |\Delta T| < T'_+ - T'_- \\ \left( L_{on} + \frac{\Delta T}{T'_+ - T'_-} L_{off} \right) P_N & \Delta T \geq 0 \text{ 且 } |\Delta T| < T'_+ - T'_- \\ P_N & \Delta T \geq 0 \text{ 且 } |\Delta T| \geq T'_+ - T'_- \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $L_{on}$  为处于启动状态的温控负荷百分比;  $L_{off}$  为处于停止状态的温控负荷百分比;  $P_N$  为可控负荷聚合体的额定有功功率。

## 2 计及辅助服务的源荷调频效益计算

针对惯量及一次调频时间尺度, 考虑辅助服务下的源荷协同调频, 根据DFIG调频、可控负荷一次调频、柴油机惯量及一次调频, 给出源荷提供辅助服务的效益和成本计算方法, 得到系统综合经济效益。

### 2.1 调频辅助服务定价

爱尔兰的DS3中调频辅助服务的补偿标准<sup>[16]</sup>以及本文所使用的补偿标准<sup>[17]</sup>如表1所示。表中,  $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$ 为SIR的分段电价;  $C_R$ 为预留调频备用容量的容量电价;  $C_B$ 为VFFR的调频电量电价;  $C_L$ 为FFR的调频电量电价;  $C_C$ 为POR的调频电量电价。FFR为风电机组、光伏、负荷、储能等元件提供频率响应<sup>[18]</sup>。风电机组提供的VFFR属于FFR, 由于其响应速度快, 在0~2 s内就能抑制频率变化, 因此收费是FFR的3倍。

表1 调频辅助服务市场价格

Table 1 Price of frequency regulation ancillary service in market

辅助服务类型	缩写	单位	作用时间/s	文献[16]DS3补偿标准/ [€·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	本文补偿标准/ [€·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
同步惯量响应	SIR	MW·s <sup>2</sup> ·h	0~5	0.005	$C_{s1}=0.0048$ $C_{s2}=0.0042$
虚拟惯量响应	VFFR	MW·h	0~10	6.48	$C_R=0.78$ $C_B=6.18$
快速频率响应	FFR	MW·h	2~10	2.16	$C_L=2.06$
一次频率响应	POR	MW·h	5~15	3.24	$C_C=3.09$

各辅助服务参与调频的时间尺度如图1(a)所示, 传统发电机组提供的SIR与负荷提供的FFR在系统频率发生扰动时的响应曲线如图1(b)所示。

### 2.2 DFIG调频效益计算

风电机组参与系统辅助调频会造成一定的经济损失, 设定电量电价以补偿风电机组提供调频辅助服务的调频电量。当辅助服务未被调用时, 设定容量电价以补偿风电机组的容量成本和机会成本, 并考虑提供辅助服务能力的时间。

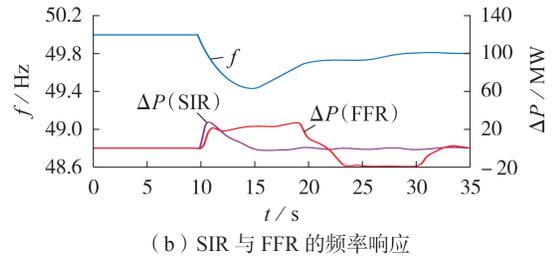
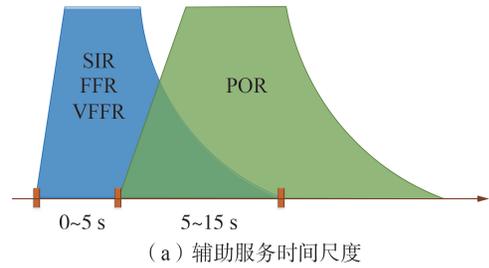


图1 调频辅助服务的曲线

Fig.1 Curves of frequency regulation ancillary service

风电机组参与调频后转子转速下降, 在转速回升的过程中DFIG出力会出现反向缺额, 吸收功率进行转子动能的存储。根据风电机组辅助调频输出的有功功率  $P_{DFIG}$  曲线(如图2所示), 将调频过程分为超速减载阶段、辅助调频阶段和转速恢复阶段<sup>[19]</sup>。调频效益定义为辅助调频阶段DFIG的实际输出电量所获取的电量收益; 调频成本包括减载成本和调频恢复成本, 其中减载成本为采用DFIG超速减载控制所产生的弃风成本。

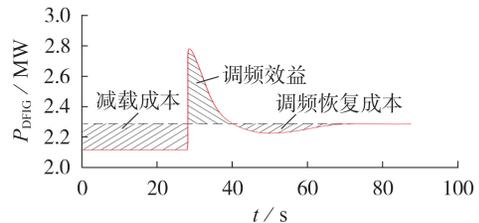


图2 DFIG有功功率曲线

Fig.2 Active power curve of DFIG

因此, 定义风电机组经济效益为调频效益减去调频恢复成本以及减载成本, 如式(9)所示。

$$B_{wind0} = P_{res}(C_R + C_E - C_D) + P_{fre}C_B + P_{rec}C_D \quad (9)$$

式中:  $B_{wind0}$  为风电机组的经济效益;  $P_{res}$  为采用超速减载控制后风电机组少发的电量;  $P_{fre}$  为调频过程中DFIG增发的调频电量;  $P_{rec}$  为调频恢复过程中DFIG少发的电量;  $C_E$  为风电的度电成本;  $C_D$  为风电市场电价。根据北极星风力发电网,  $C_E$ 取0.036 €/(kW·h),  $C_D$ 取0.038 €/(kW·h)。

为了衡量不同风电机组提供调频辅助服务的性能差异, 在调频辅助服务市场的结算中引入调频性能指标  $K$ , 包括调频精度指标  $K_1$ 、响应时间指标  $K_2$ 、调频速率指标  $K_3$ 。风电机组的调频性能指标越高,

表明提供的调频服务质量越好,获得的调频收益也越多,有利于促进风电机组提高自身的调频性能<sup>[20]</sup>。

1)调频精度指标。

$$K_1 = 1.0 + (P_T/P_{DFIG} - p)m \quad (10)$$

式中: $p = P_{opt}/P_N$ ;  $P_{DFIG}$  为风电机组的额定出力;  $P_T$  为风电机组实际调节容量;  $m$  为一个常系数。当  $P_T = pP_{DFIG}$  时,调频精度指标  $K_1 = 1.0$ 。

2)响应时间指标。

$$K_2 = \frac{t_N}{t'} \quad (11)$$

式中: $t'$  为风电机组在频率发生波动到开始调频的时间;  $t_N$  为风电机组的标准响应时间,即所有风电机组响应时间的平均值。

3)调频速率指标。

$$K_3 = \frac{|v|}{v_N} \quad (12)$$

式中: $v$  为风电机组调节速率,如式(13)所示;  $v_N$  为风电机组调频的标准调节速率,即所有风电机组调节速率绝对值的平均值。

$$v = \frac{\Delta P_{max}}{t_{on} - t_{max}} \quad (13)$$

式中: $\Delta P_{max}$  为调频过程中的出力最大值与开始调频时的出力的差值;  $t_{on}$  和  $t_{max}$  分别为机组开始调频所对应的时间和调频出力最大时所对应的时间。

则调频性能指标  $K$  是风电机组某次辅助调频的调节速率指标、响应时间指标和调节精度指标的综合体现,如式(14)所示。

$$K = \alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2 + \alpha_3 K_3 \quad (14)$$

式中: $\alpha_1$ — $\alpha_3$  为权重系数,本文取  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$ 。

因此,考虑调频性能指标的风电机组经济效益  $B_{wind}$  为:

$$B_{wind} = [P_{res}(C_R + C_E - C_D) + P_{fre}C_B + P_{rec}C_D]K \quad (15)$$

### 2.3 可控负荷一次调频效益计算

可控负荷参与微电网辅助调频会影响用户的满意度,需要以经济激励和价格补偿的手段引导负荷侧参与调频。

可控负荷的成本主要由用户满意度成本和设备磨损度成本 2 个方面构成。

1)用户满意度成本。

负荷参与辅助调频使实际温度偏离了用户的理想温度,降低了用户的满意度。用户满意度降低的速度与  $|\Delta T|$  呈正相关,则用户满意度成本  $\beta_c$  增加的速度与  $|\Delta T|$  呈负相关,即:

$$\frac{d\beta_c}{d\Delta T} = \begin{cases} m_1 \Delta T & f - f_N > 0 \text{ 且 } \Delta T > 0 \\ -m_1 \Delta T & f - f_N < 0 \text{ 且 } \Delta T < 0 \end{cases} \quad (16)$$

则用户满意度成本  $\beta_c$  为:

$$\beta_c = \beta_0 + m_1 (\Delta T)^2 = \beta_0 + m_1 K_f^2 (f - f_N)^2 \quad (17)$$

式中: $\beta_0$  与  $m_1$  为常数。 $\beta_c$  的值越大,表示用户满意度

越低,成本越高。

2)设备磨损度成本。

可控负荷参与辅助调频而进行的通断电切换会给负荷本身带来一定的磨损,设备磨损度与调频次数、磨损系数有关<sup>[21]</sup>,如式(18)所示。

$$\beta_a = \sum_{i=1}^N C_i \alpha_i \quad (18)$$

式中: $\beta_a$  为可控负荷的设备磨损度成本;  $N$  为系统可控负荷的个数;  $C_i$  为第  $i$  个可控负荷的调频次数;  $\alpha_i$  为第  $i$  个可控负荷的设备磨损系数,可由工厂提供。

当微电网频率下降时,可控负荷聚合体的有功消耗量见附录 A 图 A5。

为了补偿由于可控负荷参与调频造成的影响用户满意度和设备磨损度,设置了价格补偿。为了寻找较为合适的用户需求响应度系数  $K_f$ ,根据可控负荷的设备磨损度和用户满意度进行参数优化。计算参数优化时的可控负荷效益  $B_{load}$  为:

$$B_{load} = C_L \int_{t_{on}}^{t_{off}} \Delta P_{load} dt - \beta_c - \beta_a \quad (19)$$

式中: $\Delta P_{load}$  为调频期间负荷有功消耗量的变化量。

计算综合经济效益时的可控负荷经济效益  $B_{load}$  为:

$$B_{load} = C_L \int_{t_{on}}^{t_{off}} \Delta P_{load} dt \quad (20)$$

### 2.4 柴油机惯量及一次调频效益计算

当微电网发生扰动时,柴油机的调频容量主要由静态调差系数决定<sup>[22]</sup>。柴油机的静态调差系数  $\delta_G$  为:

$$\delta_G = \frac{1}{K_G} = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \quad (21)$$

式中: $K_G$  为柴油机单位调节功率;  $\Delta P_G$  为柴油机输出有功功率变化量。因此,改变  $K_G$  的大小即可调整柴油机的调频容量。

柴油机参与调频辅助服务可分为 3 个部分,分别是 SIR、POR 和二次频率响应(SOR),本文不考虑二次调频的时间尺度。

参考爱尔兰的调频辅助服务结算方法,SIR 服务按照柴油机的在线时长进行收费,计算方法如式(22)—(26)所示。

$$K_E = I = HS_G \quad (22)$$

式中: $K_E$  为柴油机存储的动能,单位为  $MW \cdot s$ ;  $I$  为系统惯量,单位为  $MW \cdot s$ ;  $H$  为柴油机的惯性时间常数,单位为  $s$ ;  $S_G$  为在线容量,单位为  $MW$ 。

$$M_{SIR} = K_E (M_{SIRF} - 15)U \quad (23)$$

$$M_{SIRF} = \frac{K_E}{G_{min}} \quad (24)$$

式中: $M_{SIR}$  为柴油机能够提供同步惯量响应的容量,单位为  $MW \cdot s^2$ ;  $U$  为柴油机的单元状态,在线时

取  $U=1$ , 离线时取  $U=0$ ;  $M_{\text{SIRF}}$  为柴油机存储的动能在最低可持续输出的发电机功率下能运行的时间, 单位为 s;  $G_{\text{min}}$  为最低可持续输出的发电机功率, 单位为 MW。

根据  $M_{\text{SIRF}}$  的大小对惯量电价进行分段, 则柴油机同步惯性响应的在线收益  $B_{\text{if}}$  为:

$$B_{\text{if}} = \begin{cases} M_{\text{SIRF}} TC_{s1} & M_{\text{SIRF}} \geq 35 \text{ s} \\ M_{\text{SIRF}} TC_{s2} & M_{\text{SIRF}} < 35 \text{ s} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $T$  为柴油机的在线运行时长, 单位为 h。

则柴油机的 POR 收益  $B_{\text{pf}}$  为:

$$B_{\text{pf}} = C_G \int_{t_{\text{on}}}^{t_{\text{off}}} \Delta P_G dt \quad (26)$$

柴油机燃料消耗与其发出的有功功率有关, 则柴油机参与调频的燃料成本  $F_{\text{fuel}}$  计算公式如下:

$$F_{\text{fuel}} = a + bP_{\text{De}} + cP_{\text{De}}^2 \quad (27)$$

式中:  $P_{\text{De}}$  为柴油机有功出力;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数<sup>[23]</sup>, 取  $a=6$ 、 $b=0.012$ 、 $c=8.5 \times 10^4$ 。

因此, 柴油机因提供调频辅助服务而额外增加的燃料成本如下:

$$\Delta F_{\text{fuel}} = F_{\text{fuel0}} - F_{\text{fuel}} \quad (28)$$

式中:  $\Delta F_{\text{fuel}}$  为参与辅助调频后的额外燃料成本;  $F_{\text{fuel0}}$  为柴油机参与调频后的总燃料成本;  $F_{\text{fuel}}$  为未参与调频时的燃料成本。

综上, 柴油机的经济效益  $B_G$  为:

$$B_G = B_{\text{if}} + B_{\text{pf}} - \Delta F_{\text{fuel}} \quad (29)$$

### 3 计及综合经济效益最优的源荷协同辅助调频策略

当微电网出现负荷波动时, 柴油机、DFIG 与可控负荷共同参与辅助调频。微电网的综合经济效益为  $S$ , 如式(30)所示。

$$S = \max(B_{\text{load}} + B_{\text{wind}} + B_G) \quad (30)$$

#### 3.1 源荷协同辅助调频策略

柴油机调频功率的大小取决于  $K_G$ , DFIG 的调频功率取决于  $K_d$ 、 $K_{\text{in}}$  以及  $d$ , 可控负荷的减载功率取决于  $K_f$ 。因此调整以上参数的大小可以调整三者的功率分配, 达到源荷协同辅助调频的目的。

柴油机在参与一次调频过程中, 其调差系数需满足一定的约束条件, 一般假设调差系数  $\delta_c$  为 0.04~0.06,  $K_G$  为 17~25。由于柴油机在微电网中的占比较小,  $K_G$  的不同取值对系统经济效益的影响较小, 故本文取  $K_G=20$ , 为固定值。DFIG 转子转速  $\omega_r$  运行范围一般在 0.67~1.33 p.u. 之间。

$K_{\text{in}}$ 、 $K_d$ 、 $d$  以及  $K_f$  的不同取值会影响系统调频经济效益, 为了使经济效益以及调频效果达到最优, 需要寻找最优参数。由于参数过多且不同取值的组合过于庞大, 为了使得优化结果较为接近全局最优解, 本文使用 DBN 进行参数的训练及优化。则源荷协

同参与辅助调频的控制策略如图 3 所示。

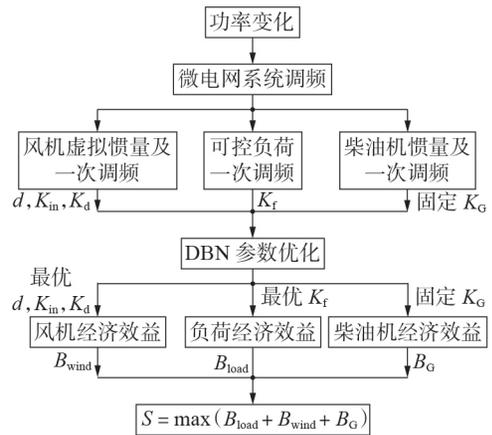


Fig.3 Framework of source-load coordinated frequency regulation strategy

微电网受到小扰动后, 频率变化率的初始值和频率动态变化的最小值  $f_{\text{Nadir}}$  是维持频率稳定性的重要指标, 因此为衡量系统的调频效果并找到最优控制参数, 建立综合调频指标  $F$  如式(31)所示。

$$F = 0.3\Delta f_{\text{max}} + 0.3|R_{\text{down}}| - 0.2R_{\text{up}} + 0.2\Delta f_s \quad (31)$$

$$R_{\text{down}} = \frac{\Delta f_{500\text{ms}}}{0.5 \text{ s}} \quad (32)$$

$$R_{\text{up}} = \frac{\Delta f_{\text{max}} - \Delta f_s}{t_s - t_m} \quad (33)$$

式中:  $\Delta f_{\text{max}}$  为最大频率偏差值, 为系统基准频率  $f_N$  与  $f_{\text{Nadir}}$  的差值;  $\Delta f_s$  为稳态频率偏差值;  $R_{\text{down}}$  为频率发生波动后 500 ms 内的频率下降速率;  $\Delta f_{500\text{ms}}$  为发生波动后 500 ms 内的频率偏差;  $R_{\text{up}}$  为频率恢复速率;  $t_m$  为最大频率偏差值  $\Delta f_{\text{max}}$  出现的时间;  $t_s$  为系统恢复稳态的时间。  $F$  的值越小, 表明调频效果越好。

#### 3.2 基于 DBN 的参数优化

通过人工智能方法可以得到最优参数, 如 BP 神经网络、支持向量机 (SVM) 和 DBN 等。BP、SVM 和 DBN 都能够处理参数与频率调节效果之间复杂的非线性关系, 但 DBN 的预测精度高于 BP 和 SVM<sup>[24]</sup>, 因此本文采用 DBN 来进行参数优化。DBN 的基本组成单元为限制玻尔兹曼机 (RBM), 多个 RBM“串联”组成 DBN, 上一个 RBM 的隐层作为下一个 RBM 的显层, 具体见附录 A 图 A6。

由于深层网络较容易陷入局部最优解, 而初始参数的选择对网络最终收敛位置有很大影响, 因此 DBN 训练过程的第一步就是分别单独无监督地训练每一层的 RBM, 将各层训练所得值作为下一层神经元的初始参数, 以确保特征学习的准确度, 这一步称为“预训练”。第二步则是利用带标签数据采用 BP 算法进行“微调”, 在 DBN 的最后一层设置 BP 网络以 RBM 的输出特征向量作为输入, 进行反向网络权

值的调整,BP算法只需要对权值参数空间进行局部搜索,相比前向BP算法的效率更高。

当风速为9 m/s时,控制参数 $K_d$ 取值范围为0~25, $K_{in}$ 取值范围为0~25, $d$ 取值范围为1%~10%, $K_f$ 取值范围为0~500。4个控制参数的不同组合共有62 500种,本文随机选取1 800种组合进行仿真,将参数组合作为DBN训练的输入数据,将仿真结果作为DBN训练的输出数据。训练完成后,通过DBN预测其他组合情况下的系统经济效益以及调频指标值。DBN参数优化流程图见附录A图A7。

DBN参数优化过程中,从所有预测组合中选择出满足转速约束条件( $0.67 \text{ p.u.} \leq \omega_r \leq 1.33 \text{ p.u.}$ )的参数组合,计算其综合经济效益 $S$ ,在所有组合中选取综合经济效益 $S$ 在前5%的参数组合。为了保证微电网经济效益最优且具有较好调频效果,计算已取得综合经济效益 $S$ 在前5%的参数组合的综合调频指标 $F$ ,选取 $F$ 的最小值 $F_{\min}$ 对应的组合,从而得到所需的最优控制参数。

## 4 算例分析

本文搭建了如图4所示的微电网系统以进行仿真分析,新能源渗透率为74%,其中风电渗透率为67%。图中,on/off表示开关状态。

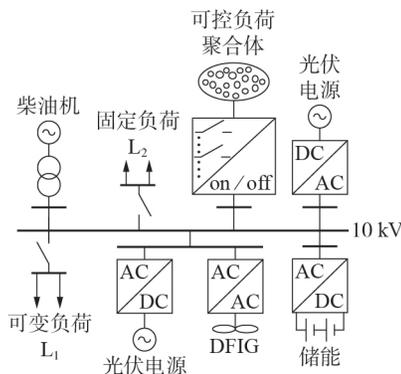


图4 微电网系统  
Fig.4 Microgrid system

该微电网系统由额定功率为4 MW的柴油机、1 MW的小型光伏电站、10 MW的DFIG、1 MW可控负荷聚合体、2 MW蓄电池储能组成,固定负荷 $L_2$ 为6 MW,可变负荷 $L_1$ 为2 MW。柴油机由同步发电机代替,并配有调速器和自动电压调节器,惯性时间常数 $H=5 \text{ s}$ ,DFIG按 $d$ 减载曲线运行。微电网孤岛运行时采用下垂控制策略,柴油机为微电网的平衡节点;光伏按恒功率控制模式运行,假设此段时间光伏电池一直处于最大功率运行点;固定负荷、可变负荷均采用恒功率负荷模型。

### 4.1 基于DBN的参数优化

以图4所示的孤岛微电网为仿真模型,采用3.2

节基于DBN的控制参数优化方法,可得到微电网受到小扰动后的最优控制参数与减载率的取值。当风速为9 m/s时,控制参数 $K_d$ 取值为24, $K_{in}$ 取值为21, $d$ 取值为9%, $K_f$ 取值为450。此时微电网的调频经济效益最优,同时能达到调频效果较好。DBN训练结果与实际值的误差对比如表2所示,表中 $\omega_{\min}$ 为DFIG转速的最小值,为标么值。可见DBN在大数据回归预测方面误差较小,在数据预测方面具有一定的优越性。

表2 DBN优化后的最大训练误差对比

Table 2 Comparison of maximum training error after DBN optimization

参数	最大训练误差	参数	最大训练误差
$\Delta f_{\max} / \text{Hz}$	0.0095	$R_{\text{down}} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0257
$\Delta f_s / \text{Hz}$	0.0071	$R_{\text{up}} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0125
$\omega_{\min}$	0.0099	$S / \text{€}$	0.0674

## 4.2 计及经济效益最优的源荷协同调频效果分析

### 4.2.1 可控负荷调频效果分析

分别在 $t=30 \text{ s}$ 时投入2 MW临时负荷以及切除2 MW临时负荷,对微电网造成小扰动,DFIG及柴油机按照DBN优化后的控制参数参与调频,改变可控负荷的用户需求响应度系数 $K_f$ ,验证其调频效果。不同 $K_f$ 取值下的可控负荷有功功率以及相应 $K_f$ 取值下的微电网频率见附录A图A8。可以看出,可控负荷在频率事故发生初期,为微电网提供了一定的调频备用。用户需求响应度系数 $K_f$ 取值越大,可控负荷响应系统频率的减载程度越高,相应地,对频率最低点和最高点的改善效果越好。

### 4.2.2 源荷协同辅助调频效果分析

为验证计及经济效益最优的源荷协同辅助调频策略的调频效果,设置 $t=30 \text{ s}$ 时投入2 MW临时负荷对微电网造成扰动,设置不同的控制参数,如表3所示,并对比了其相应的柴油机、风电机组、可控负荷的有功功率出力,分别如图5(a)—(c)所示。不同参数下的微电网频率如图5(d)所示,蓄电池储能有功功率曲线如附录A图A9所示,变风速下发生负荷扰动时的频率曲线如附录A图A10所示。

从图5(a)—(c)中可以看出,微电网扰动发生后,DFIG和可控负荷的调频功率越高,柴油机的初始调频功率越低,说明DFIG和可控负荷参与微电网

表3 不同情景下的参数

Table 3 Parameters under different cases

情景	调频控制方式	参数设置
1	最优参数下的源荷协同调频	$K_{in} = 21, K_d = 24, d = 9\%, K_f = 450, K_c = 20$
2	最优参数下的风电机组调频	$K_{in} = 21, K_d = 24, d = 9\%, K_c = 20$
3	一般参数下的源荷协同调频	$K_{in} = 10, K_d = 10, d = 5\%, K_f = 200, K_c = 20$

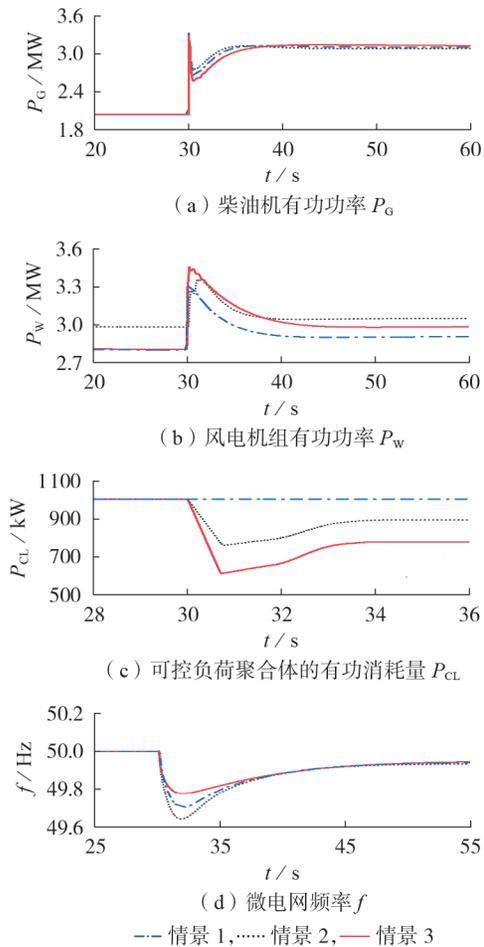


图5 不同情景下的仿真结果对比

Fig.5 Comparison of simulative results under different cases

调频可以减轻柴油机的调频压力。图5(d)表明最优参数下的源荷协同调频效果优于单风电机组调频效果,且优于一般控制参数下的源荷协同调频效果。因此,源荷协同调频可以有效减小动态频率偏差,增强微电网的一次频率调节能力。

计算不同调频控制方式下的综合调频指标值  $F$ ,情景1为0.12835,情景2为0.17694,情景3为0.19527。可以看出最优参数下的源荷协同调频控制方式的综合调频指标值  $F$  最小,调频效果优于其他调频控制方式。

#### 4.3 调频经济性分析

为验证计及经济效益最优的源荷协同辅助调频策略的经济性,对不同调频方式(情景1—3)进行经济性分析,微电网调频100次的结果如表4所示。

根据第2节所提的源荷调频效益计算方法,分别计算了DFIG和可控负荷以及柴油机的调频效益、调频成本、经济效益。可见计及经济效益最优的源荷协同调频方式所获得的综合经济效益高于其他2种控制方式,该策略可以使调频参与者获得相应的调频收益,并且最大化微电网的综合调频效益,激发

表4 不同情景下的经济效益分析

指标	情景1	情景2	情景3
调频效益 / €	2.8724	2.7513	2.4452
调频成本 / €	0.7359	0.7468	0.5218
综合经济效益 / €	2.1365	2.0045	1.9234
综合经济效益提升率 / %	11.08	4.22	—

源荷参与调频的积极性。

## 5 结论

本文探究了高比例新能源微电网中源荷参与辅助调频的方法,提出了计及辅助服务的源荷协同辅助调频优化控制策略,用于激励源荷提供辅助服务,提升微电网的频率稳定,所得结论具体如下。

1)基于DFIG调频、可控负荷一次调频、柴油机惯量及一次调频控制,给出了源荷参与调频辅助服务的调频成本及效益计算方式,通过辅助服务机制激励源荷提供调频辅助服务。

2)源荷协同参与辅助调频,考虑微电网综合经济效益的最优并保证其调频效果,利用DBN优化DFIG减载率以及虚拟惯量、超速控制、可控负荷的控制参数,对控制参数及综合调频指标进行寻优。

3)通过仿真验证所提优化控制策略的有效性。仿真结果表明,相比于其他控制方式,该策略能使微电网源荷获得最优的调频经济效益,并具有较好的调频效果,能够激发源荷的调频积极性,缓解高比例新能源微电网中传统机组的调频压力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 谢平平,朱继忠,禩培正,等. 源荷协同辅助服务市场框架及经济性分析[J]. 南方电网技术,2017,11(2):50-56.  
XIE Pingping, ZHU Jizhong, XUAN Peizheng, et al. Market framework and economic analysis of generation-demand cooperative ancillary service[J]. Southern Power System Technology, 2017,11(2):50-56.
- [2] 李少林,秦世耀,王瑞明,等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):145-150,156.  
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(4):145-150,156.
- [3] 沈运帷,李扬,高赐威,等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):151-161.  
SHEN Yunwei, LI Yang, GAO Ciwei, et al. Application of demand response in ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(22):151-161.
- [4] 何永秀,陈倩,费云志,等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术,2018,42(9):2915-2922.  
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China [J]. Power System Technology, 2018,42(9):2915-2922.
- [5] 陈达鹏,荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析

- [J]. 电力系统自动化,2017,41(18):1-9.  
CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. Analysis of frequency modulation compensation mechanism in frequency modulation ancillary service market of the United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18):1-9.
- [6] 周保荣,黄廷城,张勇军. 计及激励型需求响应的微电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(13):70-78.  
ZHOU Baorong, HUANG Yancheng, ZHANG Yongjun. Reliability analysis on microgrid considering incentive demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13):70-78.
- [7] NAVID R, MOHSEN K. Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept: an integrated demand response and droop controlled distributed generation framework[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 92(1):287-301.
- [8] WU Y, 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.
- [9] 刘萌,褚晓东,张文,等. 计及网络约束的源-荷协同频率控制策略[J]. 电工技术学报,2016,31(6):195-205.  
LIU Meng, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Cooperative generation-load frequency control strategy accounting for power network constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6):195-205.
- [10] 王德志,张孝顺,刘前进,等. 基于集成学习的孤岛微电网-荷协同频率控制[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):46-52.  
WANG Dezhi, ZHANG Xiaoshun, LIU Qianjin, et al. Ensemble learning for generation-consumption coordinated frequency control in an islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10):46-52.
- [11] WEN G, HU G, HU J, et al. Frequency regulation of source-grid-load systems: a compound control strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 1(12):69-78.
- [12] 吴鸣,宋振浩,吕振宇,等. 计及综合效益的虚拟同步化微电网二次调频策略[J]. 中国电机工程学报,2020,40(3):743-754.  
WU Ming, SONG Zhenhao, LÜ Zhenyu, et al. Secondary frequency regulation strategy of virtual synchronization technology based microgrid considering the integrated benefit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3):743-754.
- [13] 张峰,孟高军,孙玉坤,等. 高渗透率风电并网下的电力系统调频技术综述[J]. 电气应用,2019,38(9):19-26.  
ZHANG Feng, MENG Gaojun, SUN Yukun, et al. Review on power system frequency modulation technology under high permeability wind power grid connection[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(9):19-26.
- [14] 张冠锋,杨俊友,孙峰,等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报,2017,32(22):225-232.  
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, et al. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22):225-232.
- [15] 彭春华,张金克,陈露,等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):1-7.  
PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):1-7.
- [16] GAFFNEY F, DEANE J P, GALLACHÓIR B P Ó. Reconciling high renewable electricity ambitions with market economics and system operation: lessons from Ireland's power system[J]. Energy Strategy Reviews, 2019, 26(1):100381.
- [17] Single Electricity Market Committee. DS3 system services tariffs and scalars SEM committee decision SEM-17-080[EB/OL]. (2017-10-24)[2020-08-02]. <https://www.semcommittee.com/sites/semcommittee.com/files/media-files/SEM-17-01-7%20DS3%20System%20Services%20Future%20Approach%20Information%20Paper.pdf>.
- [18] 兰飞,潘益丰,时萌,等. 双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J]. 电力系统自动化,2019,43(12):51-61.  
LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, et al. Optimal variable-coefficient virtual inertia control for DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12):51-61.
- [19] HAZEM K, ZAKIR H R, DAMIAN F, et al. Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems: a critical review[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2019, 106(1):488-501.
- [20] 黄冬生,凡华,韦远康. 基于调频贡献率的调频辅助服务结算方法[J]. 电气自动化,2019,41(2):59-61.  
HUANG Dongsheng, FAN Hua, WEI Yuankang. Settlement method for frequency modulation auxiliary service based on frequency modulation contribution rate[J]. Electrical Automation, 2019, 41(2):59-61.
- [21] 何涌. 基于温控负荷的独立微电网频率稳定与控制研究[D]. 南宁:广西大学,2017.  
HE Yong. Research on frequency stabilization and control of isolated micro-grid based on thermostatically controlled load [D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [22] 边晓燕,姜莹,赵耀,等. 高渗透率可再生能源微电网的风柴荷协调调频策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(15):102-109.  
BIAN Xiaoyan, JIANG Ying, ZHAO Yao, et al. Coordinated frequency regulation strategy of wind, diesel and load for microgrid with high-penetration renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15):102-109.
- [23] 赵晶晶,徐传琳,吕雪,等. 微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(15):4324-4332, 4572.  
ZHAO Jingjing, XU Chuanlin, LÜ Xue, et al. Optimization of micro-grid primary frequency regulation reserve capacity and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15):4324-4332, 4572.
- [24] 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 LWTCs based on deep belief network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):76-82.

## 作者简介:



楼佩婕

楼佩婕(1996—),女,浙江金华人,硕士研究生,主要研究方向为风机调频控制、调频辅助服务市场(E-mail:loukiro@163.com);

边晓燕(1976—),女,上海人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为风机控制、电力系统有功控制、电力系统分析与稳定性(E-mail:kuliz@163.com);

崔勇(1985—),男,上海人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力调控运行(E-mail:yongzhen578@163.com)。

(编辑 李玮)

(下转第177页 continued on page 177)

177-211.

- [18] FACCHINEI F, FISCHER A, PICCIALLI V. On generalized Nash games and variational inequalities[J]. Operations Research Letters, 2007, 35(2): 159-164.

#### 作者简介:

陈雨甜(1998—),女,江西抚州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与运行(E-mail: cyt2019@stu.xjtu.edu.cn);



陈雨甜

王秀丽(1961—),女,山西河曲人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统规划和电力市场(E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn);

钱涛(1995—),男,江苏南通人,博士研究生,主要研究方向电力系统规划与运行(E-mail: taylorqian@stu.xjtu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

## Energy management of microgrid based on generalized Stackelberg game

CHEN Yutian, WANG Xiuli, QIAN Tao, WU Xiong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to realize the optimal energy management of microgrid and maximize social benefit of single microgrid and multiple consumers, a generalized Stackelberg game model between a microgrid and multiple consumers is built based on noncooperative game theory, in which, the microgrid, as the leader, takes the maximum revenue as the objective to optimize the electricity price and guide the consumers to adjust their power consumption strategies, while the consumers, as the followers, takes their respective maximum utility functions as the objective to decide power consumption strategies under the given price and influence the electricity price setting. The generalized Nash equilibrium problem is converted into variational inequality, which is solved by the projection algorithm with constant step and the best response algorithm. The effectiveness of the proposed model is verified by a practical example of a community microgrid.

**Key words:** microgrid; energy management; generalized Stackelberg game; variational inequality; generalized Nash equilibrium

(上接第 163 页 continued from page 163)

## Optimal control strategy of source-load coordinated frequency regulation in microgrid considering ancillary service

LOU Peijie<sup>1</sup>, BIAN Xiaoyan<sup>1</sup>, CUI Yong<sup>2</sup>, WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, LIN Shunfu<sup>1</sup>, ZHAO Yao<sup>1</sup>

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

2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

**Abstract:** In a renewable-dominated microgrid, the shortage of frequency regulation resources and the low willingness of power sources and loads to participate in frequency regulation negatively impact the power system frequency stability. An optimal control strategy of source-load coordinated frequency regulation in microgrid is proposed, in which the optimal comprehensive economic benefits are considered, and wind turbines and controllable loads are motivated to provide frequency regulation ancillary services by the ancillary service mechanism. Additionally, the benefits and costs are calculated according to the ancillary service provided by frequency regulation of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator), primary frequency regulation of controllable load and inertia frequency regulation and primary frequency regulation of diesel engine. The present work comprehensively considers economic benefits and frequency regulation effects of microgrid, the parameters of load shedding rate, virtual inertia, droop control of DFIG, and control parameters of controllable load are optimized by DBN (Deep Belief Network). Hence, the proposed model achieves coordinated frequency regulation of DFIG, controllable load and diesel engine between multiple time scales. The effectiveness of the proposed strategy is verified by an isolated microgrid model with high penetration of renewable energy. Simulative results demonstrate that this strategy provides economic operating decisions and positively improves the frequency regulation ability, and the potential capability of source-load coordination to provide ancillary services for frequency regulation is exploited.

**Key words:** high penetration of renewable energy; microgrid; ancillary service; source-load coordinated control; frequency regulation control; economic benefit; deep belief network

附录 A

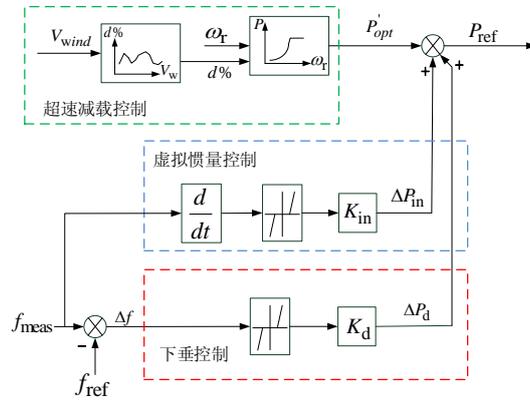


图 A1 DFIG 综合控制框图

Fig.A1 Integrated control block diagram of DFIG

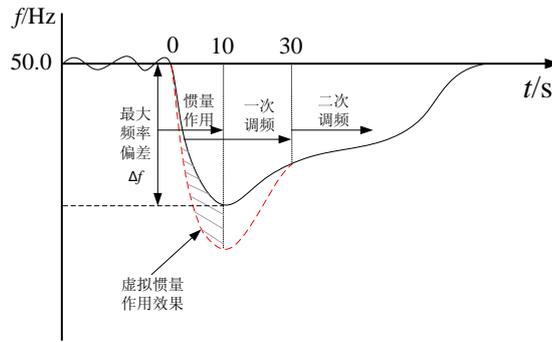


图 A2 频率控制机制

Fig.A2 Mechanism of frequency control

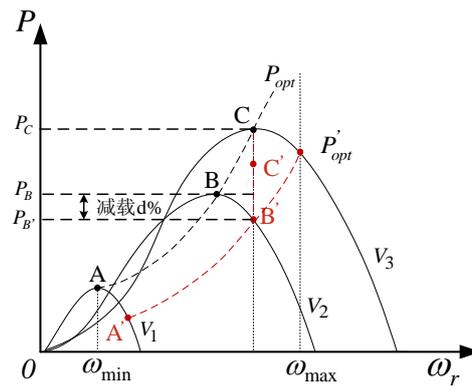


图 A3 DFIG 功率特性曲线

Fig.A3 Power characteristic curves of DFIG

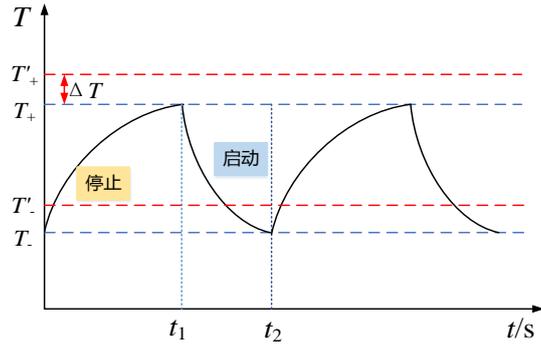


图 A4 可控负荷运行状态示意图

Fig.A4 Diagram of operating state of controllable load

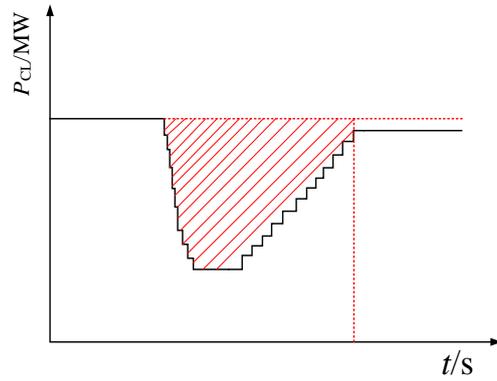
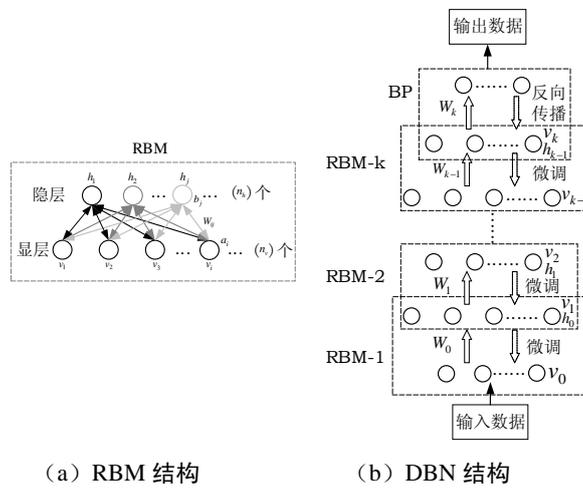


图 A5 可控负荷聚合体的有功消耗量

Fig.A5 Active power consumption of controllable load



(a) RBM 结构

(b) DBN 结构

图 A6 RBM 及 DBN 的结构

Fig.A6 Structure of DBN and RBM

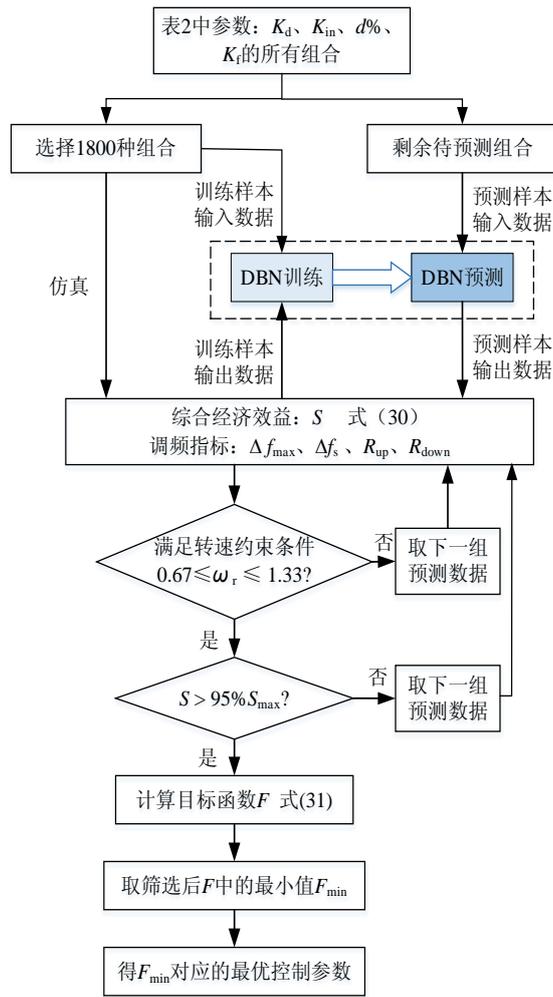
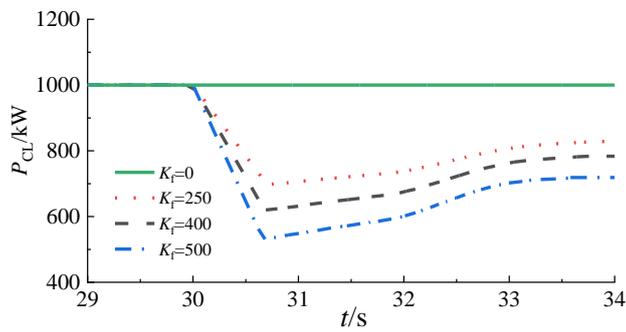
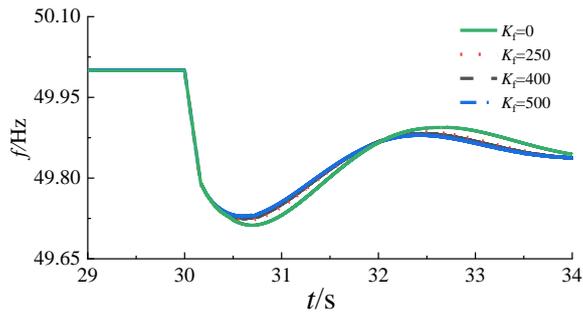


图 A7 DBN 参数优化流程

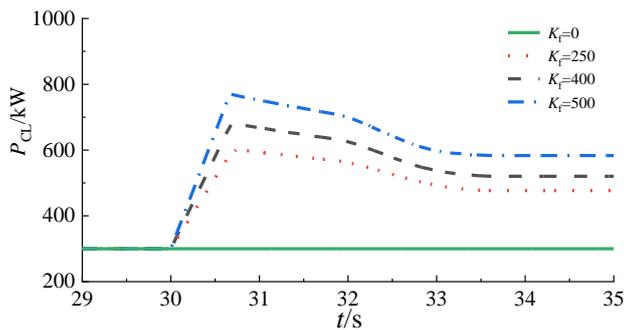
Fig.A7 Parameter optimization process of DBN



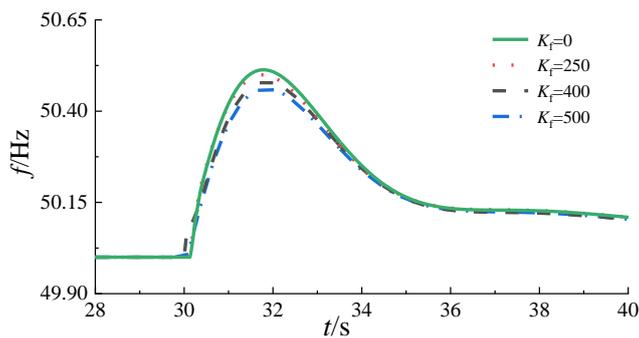
(a) 投入负荷时不同  $K_f$  取值下的可控负荷有功功率



(b) 投入负荷时不同  $K_f$  取值下的微电网频率



(c) 切除负荷时不同  $K_f$  取值下的可控负荷有功功率



(d) 切除负荷时不同  $K_f$  取值下的微电网频率

图 A8 不同  $K_f$  取值下的可控负荷有功功率及微电网频率  
Fig.A8 Active power of controllable load and the frequency of the microgrid under different  $K_f$

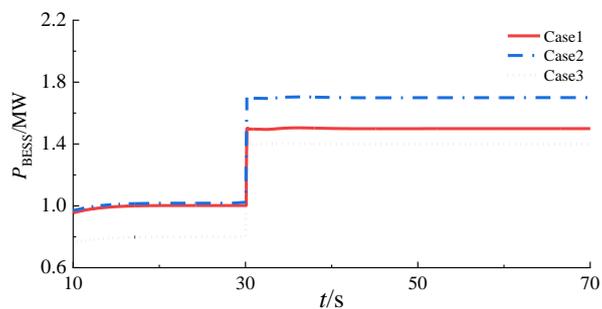


图 A9 蓄电池储能有功功率  
Fig.A9 Active power of storage battery

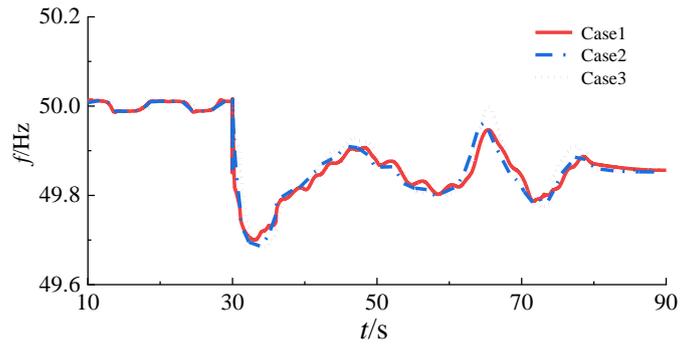


图 A10 随机风速下的微电网频率  
Fig.A10 Frequency of microgrids at random wind speeds