

聚合变频空调参与微网调频的变论域模糊 PI 控制策略

张 杰<sup>1</sup>, 撒奥洋<sup>2</sup>, 于立涛<sup>2</sup>, 周生奇<sup>2</sup>, 张智晟<sup>1</sup>

(1. 青岛大学电气工程学院, 山东 青岛 266071; 2. 国网青岛供电公司, 山东 青岛 266002)

**摘要:** 针对微电网孤岛运行模式下有功功率不平衡导致的系统频率波动问题, 本文提出了需求响应参与微电网调频的变论域模糊 PI 控制策略。通过研究各种分布式电源的发电特性, 搭建了含微型燃气轮机、储氢系统、风力发电以及用电负荷的微电网负荷频率控制模型, 其中微型燃气轮机为主调频机组, 储氢系统辅助参与调频, 并在此基础上, 以聚合变频空调为需求侧资源, 研究了需求响应参与微电网调频的变论域模糊 PI 控制策略。仿真结果表明, 采用该策略对提高频率调节速度及降低超调作用显著, 更加适应微电网调频对于时效性和精确性的要求, 有助于改善微网调频性能。

**关键词:** 需求响应; 分布式电源; 微电网; 变论域模糊 PI 控制; 频率调节

**DOI:** 10.12067/ATEEE2005015      **文章编号:** 1003-3076(2020)09-0020-08      **中图分类号:** TM732

1 引言

近年来, 在绿色节能环保意识的驱动下, 微电网成为世界各国竞相发展的一个重要领域。微电网是由分布式电源、储能系统、用电负荷以及各种监控和保护装置等组成的微型发电系统, 可以充分促进大规模可再生能源(如风能、光伏等)并入大电网, 实现分布式电源的灵活高效应用, 是建设坚强智能电网的重要组成部分。然而, 微电网中包含大量的可再生能源发电, 这种发电形式受自然天气影响较大, 其随机性、波动性、间歇性等特征给维持微电网的频率稳定带来了极大的考验。尤其是微网运行在孤岛模式下, 其频率稳定失去了大电网的支撑, 将面临更为严峻的挑战。

目前针对微电网孤岛运行模式下的频率稳定性问题已有系列研究成果, 但主要是从供给侧入手。文献[1,2], 在建立微电网模型后, 通过对分布式电源控制器的设计, 使分布式电源的输出功率更好地跟踪负荷变化, 进而平抑微电网内的频率波动。然而, 随着智能仪表和量测与传感技术的发展, 人们可以实现对一些电网友好型用电设备进行远程实时控制, 这使需求侧可控负荷参与微网系统调频成为可能。

需求响应(Demand Response, DR)是电力用户

参与电网调频的主要方式, 近年来新能源并网引起的频率稳定性问题同样使 DR 参与电网调频的研究成为热点。文献[3,4]虽然通过在电力系统频率响应模型中引入 DR 模块, 验证了 DR 参与电力系统调频的可行性, 但对 DR 的研究过于宏观, 没有涉及具体何种负荷并考虑其负荷特性。然而, 调频服务对于负荷响应的时效性和精确性有着较高的要求, 因此, 有必要将研究的重点侧重于对需求侧资源的选取及其负荷特性的分析上。

空调负荷(Air Conditioning Load, ACL)凭借其对用户舒适度影响小且负荷体量大的优势成为最具潜力的需求侧资源之一。参与调频的 ACL 根据其运行方式的不同可分为两类, 一类是能够连续调节用电功率的变频空调, 另一类则是只能控制其开关状态的定频空调<sup>[5]</sup>。目前针对 ACL 的研究大多集中于常规的定频空调, 对其参与 DR 提出了较多有效的控制策略, 如文献[6]提出的 ACL 友好温度设定值调节控制策略、文献[7]提出的 ACL 转化时间优先级队列控制策略以及文献[8]提出的 ACL 优化决策启停序列控制策略等。然而, 近年来, 变频空调的兴起使其迅速占据大部分的空调市场并呈进一步增长趋势, 但对其参与 DR 控制策略的研究却很少, 因此, 对于变频空调控制策略的研究具有重要意义。

收稿日期: 2020-05-13

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(2020A-022)

作者简介: 张 杰(1996-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调频控制;  
张智晟(1975-), 男, 山东籍, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统负荷预测和经济调度(通讯作者)。

针对上述问题, 本文提出了一种 DR 改善微网调频性能的变论域模糊 PI 控制策略。首先, 通过对各种分布式电源发电特性的研究, 搭建含微型燃气轮机、储氢系统、风力发电以及用电负荷的微电网负荷频率控制 (Load Frequency Control, LFC) 模型; 其次, 在分析了变频空调负荷特性的基础上, 将聚合变频空调模型引入到微电网 LFC 模型; 然后, 对聚合变频空调的变论域模糊 PI 控制器进行设计; 最后, 在 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型, 并通过对比实验来验证本文所提控制策略的有效性和优越性。

## 2 微网频率控制方案

本文研究的微电网系统主要由微型燃气轮机 (Micro-Turbine, MT)、储氢系统 (Hydrogen Storage System, HSS)、风力发电系统 (Wind Power, WP) 以及用电负荷 (Load) 组成。

孤岛模式下, 微电网的频率体现了系统内有功功率的平衡情况, 有功功率的供需不平衡会引起微电网的频率波动。因此, 本文通过维持微电网的有功功率平衡来平抑系统内的频率波动。参与微电网调频的分布式电源主要是 MT、HSS 等输出功率在其发电上下限范围内可以调控的可控电源, 而像 WP 这类不可控电源的发电具有随机性和间歇性, 一般工作于最大功率追踪模式且不具备调频能力<sup>[9]</sup>。

### 2.1 可控电源模型

#### 2.1.1 MT 模型

MT 是一种能够实现快速启动的分布式发电设备, 具有寿命长、燃料适应性好、清洁可靠且易于控制等优点, 因此通常被用作保障微网系统持续供电的主要设备。在微网孤岛运行时, 该类型机组可凭借其调节速度及调节容量上的优势作为主调频机组, 为维持微电网的频率稳定提供有功功率支持。本文采用文献[10]提供的典型 MT 的 LFC 模型。

#### 2.1.2 HSS 模型

HSS 主要由电解槽 (Electrolyzer System, ES)、燃料电池 (Fuel Cell, FC) 和储氢罐三部分组成, 是一种完美解决微网系统剩余能量存储的装置。该设备可以通过 ES 将微网中剩余的电量转化为  $H_2$ , 存储于储氢罐中。当电力供应时段性紧缺时, FC 可通过储氢罐中的  $H_2$  发电, 以维持微网系统中的能量守恒。另外, 储氢罐中存储的  $H_2$  还可作为 MT 的燃料供应, 以支持 MT 的发电。

HSS 中的 ES 和 FC 可分别作为可控负荷和可

控电源以辅助微网系统的频率调节。本文通过利用 ES 的快速响应能力来调节系统负荷平衡, 在建立 LFC 模型时, 主要考虑电能的消耗过程, 因此一般采用一阶惯性环节来模拟。设 ES 的传递函数为  $G_{ES}$ , 其表达式为:

$$G_{ES} = \frac{K_{ES}}{1 + sT_{ES}} \quad (1)$$

式中,  $K_{ES}$  为 ES 系统增益;  $T_{ES}$  为 ES 响应时间常数。

为考虑更多实际系统的动态特性, 以期 FC 系统能够提供更优良的负荷频率跟踪特性。本文采用文献[11]建立的 FC 的 LFC 模型。

### 2.2 DR 模型

以变频空调为例, 对 DR 参与微电网调频进行介绍。参与 DR 的变频空调用户需经过负荷聚合商实现直接负荷控制, 同时也可获得相应的经济补偿。

#### 2.2.1 变频空调热力学模型

变频空调建模是其参与 DR 的基础, 不失一般性, 本文采用当前文献最常用的空调系统一阶热力学等效参数模型, 如图 1 所示。

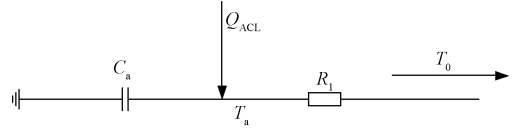


图 1 空调系统一阶热力学等效参数模型

Fig.1 First order thermodynamic equivalent parameter model of air conditioning system

图 1 中,  $C_a$  为等效比热容;  $Q_{ACL}$  为制冷 (热) 量;  $T_0$  为外界温度;  $T_a$  为室内气体温度;  $R_1$  为等效阻抗。由图 1 可知:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{R_1 C_a} (T_0 - T_a) - \frac{Q_{ACL}}{C_a} \quad (2)$$

依据式 (2) 微分方程可简单描述建筑物室内温度与空调制冷 (热) 量的时变关系, 为其在 DR 的大规模调控奠定理论基础。

#### 2.2.2 单台变频空调控制策略

变频空调的基本结构是在常规空调的结构上增加一个变频器, 变频器通过交-直-交变换将工频电源转变为频率可调的变频电源, 以控制压缩机转速改变空调制冷 (热) 量, 维持室内温度恒定。

压缩机是空调的主要耗能部件, 其能耗与它的频率有关, 可将其表达为频率的单调函数:

$$P_{ACL} = h_p(f_{ACL}) \quad (3)$$

式中,  $P_{ACL}$   $f_{ACL}$  分别为空调压缩机能耗、频率。

由于本文只控制压缩机,因此可用压缩机能耗代表参与调频的空调出力。为模拟 ACL 的热存储特性及惯性响应对系统频率调节的影响,本文采用一阶惯性环节对变频空调的功率响应进行近似,即变频空调的实际输出功率并不与其给定值在一开始就按同步比例变化,而是需要经过一定的过渡过程,过渡结束后,空调的输入输出才能保持比例变化关系。ACL 的功率响应可以表达为:

$$\frac{P_{ACL}}{P_{ACL,ref}} = \frac{K_{ACL}}{T_{ACL}s + 1} \quad (4)$$

式中,  $P_{ACL,ref}$  为变频空调功率给定值;  $K_{ACL}$  为变频空调增益;  $T_{ACL}$  为变频空调负荷响应时间常数。

如上所述,单台变频空调 DR 模型如图 2 所示。图 2 中,  $f_{ACL,ref}$  为空调压缩机频率给定值,置零控制环节能保证变频空调充分参与调频且尽量减小对用户舒适度的影响。

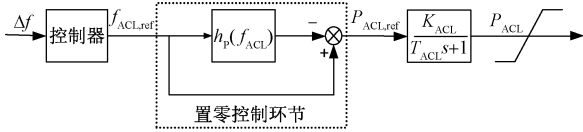


图 2 单台变频空调 DR 模型

Fig.2 Demand response model of single variable frequency air conditioner

文献[12]通过一系列实验证明空调电功率、制冷(热)量与压缩机频率近似呈一次线性关系,设空调制冷(热)量满足:

$$Q_{ACL} = h_Q(f_{ACL}) \quad (5)$$

则不难建立描述空调的电热转换关系,  $P_{ACL}$  关于  $Q_{ACL}$  的表达式为:

$$P_{ACL} = h_P(h_Q^{-1}(Q_{ACL})) \quad (6)$$

在变频空调的秒级调频模型中,由于时间尺度较短,因此本文采用线性模型描述空调的电热转换关系,其表达式为:

$$\begin{cases} P_{ACL} = k_P f_{ACL} + b_P \\ Q_{ACL} = k_Q f_{ACL} + b_Q \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $k_P$ 、 $k_Q$ 、 $b_P$ 、 $b_Q$  均为常数。

### 2.2.3 变频空调聚合控制模型

根据对上述空调所属建筑物的热力学模型、空调的电热转换模型以及单台空调的 DR 模型分析可知,变频空调参与系统调频存在以下几点优势:

(1) 建筑物具有良好的储热能力,空调产生的热量可由建筑物存储下来,受热惯性的影响,短时间内,空调出力的变化对室内温度的影响不大。

(2) 人类对温度的变化并不十分敏感,短时间尺度下,室内温度一定幅度的变化并不影响人类舒适度。

(3) 系统调频的时间尺度往往是秒级的,极其适应前者对于短时间尺度的要求。

(4) 采用控制空调压缩机转速的方式响应系统的频率调节,不仅可避免频繁启停带来的设备损坏问题,而且更适应调频对于时效性和准确性的要求。

(5) 变频空调已经占据目前空调市场的主流,而 ACL 的体量足够大(夏季高峰期时占尖峰负荷的 30%~50%),具有非常可观的负荷响应容量。

如上所述,空调所属建筑物的室内温度允许与设定温度存在一定的偏差,温度保持在这个偏差以内将不会影响用户的舒适性满意度。因此,这个温度偏差对应的空调电功率便是可控的。然而,为满足响应容量的要求,还需将大量的变频空调聚合,形成更加稳定可控的空调负荷群(Air Conditioning Loads, ACLs)。

由于建筑环境相似、空调型号相近条件下的 ACL 的出力能力近似,因此,为方便控制,可将所有变频空调按其出力能力分类聚合,则参与 DR 的变频空调总负荷为:

$$P_{ACLs} = \sum_{i=1}^n \omega_i P_{ACLi} \quad (8)$$

式中,  $\omega_i$  为各类变频空调参与调频出力时的权重因子,其作用是使不同类型的变频空调按其出力能力同等程度出力,即所有空调的频率调节速度保持一致;  $P_{ACLi}$  为第  $i$  类变频空调的出力总量,是各类变频空调中所有变频空调的出力之和。

参与 DR 的变频空调的总负荷量必须满足:

$$-\Delta P_{ACLs, \max} \leq \Delta P_{ACLs} \leq \Delta P_{ACLs, \max} \quad (9)$$

式中,  $\Delta P_{ACLs, \max}$  为不影响用户舒适度的前提下,系统内允许参与调频的变频空调的最大有功出力。

### 2.3 系统频率响应模型

微网运行在孤岛模式下,系统内频率的波动主要由微电网有功功率的供需不平衡造成。系统频率偏差  $\Delta f$  与功率偏差  $\Delta P$  存在关系如下:

$$M \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f = \Delta P = P_G - P_L \quad (10)$$

式中,  $M$  为转动惯量;  $t$  为时间;  $D$  为阻尼系数;  $P_G$  为总有功发电量;  $P_L$  为总负荷。  $P_G$ 、 $P_L$  还满足:

$$P_G = P_{MT} + P_{FC} + P_{WP} \quad (11)$$

$$P_L = P_{CL} + P_{UL} \quad (12)$$



$$P_{CL} = P_{ACLs} + P_{ES} \quad (13)$$

式中,  $P_{MT}$ 、 $P_{FC}$ 、 $P_{WP}$ 、 $P_{CL}$ 、 $P_{UL}$ 、 $P_{ACLs}$ 、 $P_{ES}$  分别为 MT 发电功率、FC 发电功率、WP 发电功率、可控负荷、不可控负荷、聚合变频空调负荷、ES 负荷。由式 (10) 可见, 无论是控制发电机还是可控负荷, 都能够起到调整微电网频率的作用。

综上所述, 微电网频率控制框图如图 3 所示, 将 MT 作为主调频机组, FC 用作辅助调频机组, ES 及 ACLs 作为可控负荷参与微网系统的调频。

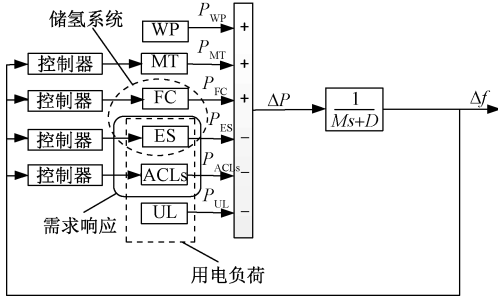


图 3 微电网频率控制框图

Fig.3 Frequency control block diagram of micro grid

MT、FC 及 ES 同样存在一定的出力约束, 其上下限表达式为:

$$P_{MT,min} \leq P_{MT} \leq P_{MT,max} \quad (14)$$

$$P_{FC,min} \leq P_{FC} \leq P_{FC,max} \quad (15)$$

$$P_{ES,min} \leq P_{ES} \leq P_{ES,max} \quad (16)$$

### 3 控制器设计

#### 3.1 PI 控制器

PI 控制器凭借其结构简单、鲁棒性好、适应性强的优势被广泛应用于电力系统的过程控制中。常规 PI 控制的原理图如图 4 所示。

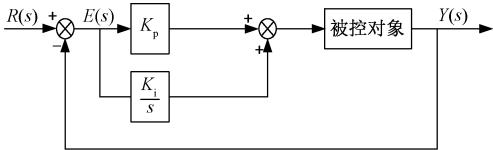


图 4 PI 控制器

Fig.4 PI controller

图 4 中,  $R(s)$  为系统输入给定值;  $E(s)$  为给定值与实际值的偏差;  $Y(s)$  为系统输出实际值;  $K_p$ 、 $K_i$  分别为比例系数和积分系数。本文侧重于 DR 参与微网系统调频的控制策略研究, 因此, 为不失一般性, 对 MT 及 HSS 的控制均采用 PI 控制器。

#### 3.2 变论域模糊 PI 控制器

变论域模糊 PI 控制是在模糊 PI 控制的基础上

做了进一步的改进, 将模糊数学理论与 PI 控制相结合, 通过模拟人类思维, 达到与人们凭经验操作相类似的控制效果。根据实际控制误差的大小, 采用伸缩因子来调整模糊论域的范围, 实现在模糊控制规则不变的情况下增加或减少模糊规则数, 从而提高控制速度与精度, 应用到难以建立精确数学模型且存在不确定因素的被控对象, 具备自适应整定的能力, 克服了常规 PI 控制工况敏感的缺点, 极其适用于对本文所提出的 DR 参与微网系统调频的控制。变论域模糊 PI 控制器原理图如图 5 所示。

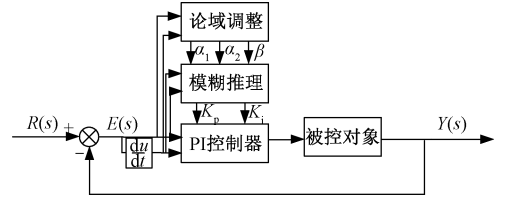


图 5 变论域模糊 PI 控制器

Fig.5 Variable universe fuzzy PI controller

图 5 中,  $du/dt$  为微分环节;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  是模糊 PI 控制器输入量论域的调整因子;  $\beta$  是模糊 PI 控制器输出量的调整因子。

如上所述, 本文选用变论域模糊 PI 控制作为 ACLs 的控制器, 其基本步骤如下: 首先, 将频率偏差  $\Delta f$  及其变化率  $d\Delta f/dt$  和 PI 参数  $K_p$ 、 $K_i$  作为模糊控制器的输入和输出, 分别将其模糊化处理, 定义为 7 个模糊子集: 负大 {NB}、负中 {NM}、负小 {NS}、零 {Z}、正小 {PS}、正中 {PM}、正大 {PB}。模糊子集的隶属度函数均采用三角形函数, 隶属度的取值范围为  $[0, 1]$ ,  $\Delta f$  及其变化率  $d\Delta f/dt$  的论域范围可根据微网系统长期的统计规律确定, PI 控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  的论域范围则采用经验试凑法整定。其次, 根据  $\Delta f$  及其变化率  $d\Delta f/dt$  来确定 PI 控制器的参数  $K_p$ 、 $K_i$ , 由其实际操作经验可以总结出模糊 PI 控制规则表。最后, 采用最大隶属度法解模糊, 将输出的模糊量转换为实际确切的值作用于 PI 控制器的参数调整, 从而达到更精确快速地控制 ACLs 的目的。

基于函数设计伸缩因子以实现论域的实时改变, 输入量  $X$  论域的伸缩变化如图 6 所示。

图 6 中, 输入量  $X$  的初始论域为  $[-E, E]$ ;  $\alpha(x)$  为输入量的伸缩因子, 是  $x$  的连续函数, 并有:

$$\alpha(x) = 1 - e^{-kx^2} \quad (17)$$

式中,  $k$  常取整数且大于零。  $k$  值越大, 论域伸缩越快;  $k$  值越小, 论域伸缩越慢。引入伸缩因子后, 输

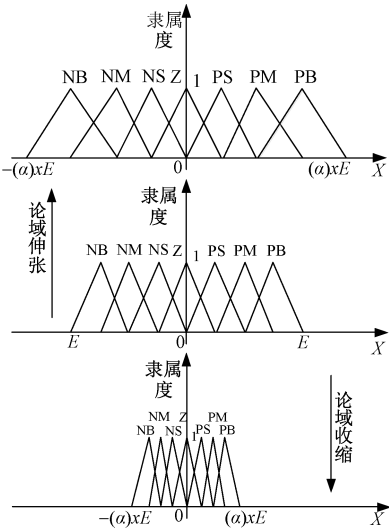


图 6 论域伸缩原理  
Fig.6 Principle of domain expansion

入量  $X$  的初始论域可通过伸缩因子实现伸张或收缩,伸缩为 $[-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$ 。这样,随着论域的伸缩变化,建立在论域上的隶属度函数也将随之变化,从而使各组模糊控制规则成为动态规则。

同理可得输出量的伸缩因子,这里不再赘述。

4 算例分析

4.1 算例介绍

为验证本文所提出的 DR 参与微电网调频控制策略的可行性,基于图 3 所示微网系统的 LFC 模型,在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型。该微电网容量为 500 kW,并选取基准容量为 500 kW,系统中包含一台微型燃气轮机、一组储氢装置、一台风电机组,风电机组一直保持环境条件下的最大功率输出,输出稳定在 0.5 pu,用电负荷中变频空调占比 30%。模型参数设定如下: $P_{MT,min}=150\text{ kW}$ , $P_{MT,max}=300\text{ kW}$ , $P_{FC,min}=75\text{ kW}$ , $P_{FC,max}=175\text{ kW}$ , $P_{EC,min}=50\text{ kW}$ , $P_{EC,max}=150\text{ kW}$ , $P_{ACLs,min}=110\text{ kW}$ , $P_{ACLs,max}=190\text{ kW}$ , $M=10$ , $D=1$ 。

本文仿真实验从两个角度出发,分别为不考虑风电及负荷随机性和考虑风电及负荷随机性的微网系统频率稳定性实验,并对以下五种控制方案进行仿真比较:

方案 1:微网中仅有 MT 参与调频,控制器采用 PI 控制。

方案 2:微网中 MT 作为主调频机组,HSS 辅助参与调频,且控制器均采用 PI 控制。

方案 3:微网中 MT 作为主调频机组,HSS 辅助

参与调频,ACLs 作为需求侧资源参与微电网调频,且控制器均采用 PI 控制。

方案 4:微网中 MT 作为主调频机组,HSS 辅助参与调频,ACLs 作为需求侧资源参与微电网调频,但 ACLs 的控制器采用模糊 PI 控制,其余控制器采用 PI 控制。

方案 5:微网中 MT 作为主调频机组,HSS 辅助参与调频,ACLs 作为需求侧资源参与微电网调频,但 ACLs 的控制器采用变论域模糊 PI 控制,其余控制器采用 PI 控制。

4.2 系统频率稳定性实验

4.2.1 不考虑风电及负荷随机性

设定在  $t=120\text{ s}$  时,由于微电网某处线路故障造成负荷发生阶跃变化,从 1.0 pu 降到 0.8 pu,当负荷降低后,系统内有功平衡被打破,产生  $\Delta P=0.2\text{ pu}$  的有功不平衡量。负荷变化曲线如图 7 所示,系统内的频率响应曲线如图 8 所示,表 1 为阶跃扰动下系统调频性能评价指标。

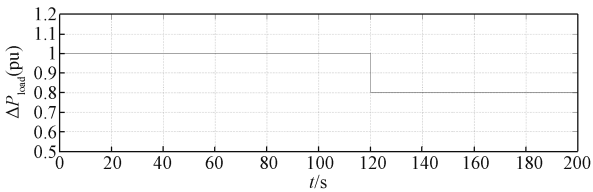


图 7 负荷阶跃变化  
Fig.7 Load step change

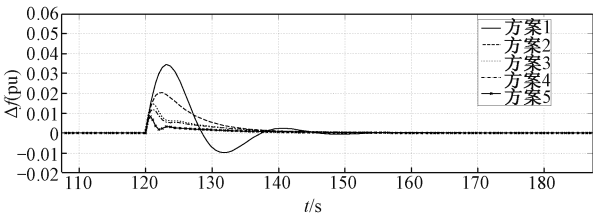


图 8 系统频率响应曲线  
Fig.8 System frequency response curve

表 1 系统调频评价指标

Tab.1 System frequency modulation evaluation index			
控制方案	最大偏差 (pu)	峰值时间/s	调节时间/s
方案 1	0.034 5	3.133 2	24.549 5
方案 2	0.020 3	2.529 5	20.001 1
方案 3	0.014 9	0.951 9	19.415 5
方案 4	0.012 0	1.082 3	18.872 9
方案 5	0.008 1	0.770 9	14.440 2

根据图 8 中方案 1、方案 2 和方案 3 的频率响应曲线及表 1 中的调频性能评价指标分析可知,在相

同 PI 控制器的作用下, 随着 HSS 及 ACLs 参与到微网系统调频, 系统内的最大频率偏差逐渐减小, 峰值时间和调节时间也逐渐缩短, 表明微网系统的调频能力及调节速度不断提高。根据方案 3、方案 4 和方案 5 的频率响应曲线及调频性能评价指标分析可知, 在 HSS 及 ACLs 均参与到微网系统调频的情况下, 采用不同的控制器来控制 ACLs 参与微网调频具有不同的控制效果。对比方案 3 和方案 4, 系统内的最大频率偏差有所减小, 表明模糊 PI 控制可在一定程度上降低系统的超调。方案 3 相对方案 4 的峰值时间要小, 调节时间要大但数值上差别不大, 可见模糊 PI 控制的模糊推理过程需要一定的前期准备时间, 但经过模糊推理得到的 PI 参数更适应系统工况, 可一定程度改善系统后期的调节速度。因此, 在总体上, 模糊 PI 控制对频率调节速度的提升并不明显。方案 5 无论是最大频率偏差还是峰值时间和调节时间都相对方案 3 和方案 4 要小, 可见变论域模糊 PI 控制通过伸缩论域不仅增加模糊规则数提高了控制精度, 还在一定程度上使模糊推理过程更灵活从而改善了系统的调节速度。方案 5 具有更好的控制效果, 更加适应微网系统的频率调节。

方案 5 各调频单元的功率响应曲线如图 9 所示。在负荷波动前, 各调频单元稳定工作在额定功率状态, 系统内的有功功率守恒, 频率偏差为零。在 120 s 时, 负荷发生阶跃变化, 系统内的有功功率平衡被打破, 各调频单元通过改变自身的输出功率以维持系统内的有功功率平衡。在负荷波动初期, MT 和 FC 的发电功率尚在爬坡, 参与调频的 ACLs 和 ES 开始动作, 抵消部分的负荷变动, 缓解对微网系统的冲击。当 MT 和 FC 通过减少功率使系统达到新的稳定状态时, 参与 DR 的 ACLs 和 ES 退出微网调频。

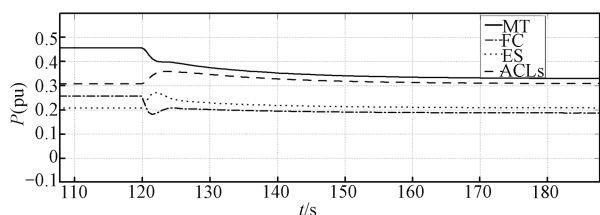


图 9 各调频单元的功率响应曲线

Fig.9 Power response curve of each frequency modulation unit

对比图 9 中 MT、FC 的功率响应曲线不难看出, FC 相较 MT 具有更快的响应速度, 且 FC 的爬坡率也优于 MT, MT 作为主调频机组的优势主要体现在其响应容量上。对比 ES 和 ACLs 的功率响应曲线可知, ES 的响应速度要优于 ACLs。

为进一步研究 ACLs 对调频的贡献, 首先, 分析不同种 ACLs 参与调频的情况, 将变频空调与定频空调作对比分析, 以验证变频空调用于需求响应的调频优越性。

图 10 是 ACLs 分别为变频空调和定频空调时, 需求响应参与微网调频的功率响应曲线。由图 10 可知, 在相同响应负荷量的情况下, 变频空调负荷具有较快的响应速度。根据图 11 的频率响应曲线不难看出, 由于变频空调负荷具有较快的功率响应速度, 因此其参与调频的频率响应速度也相对较快, 变频空调作为需求侧资源参与微网调频相对定频空调而言, 具有更好的调频效果。

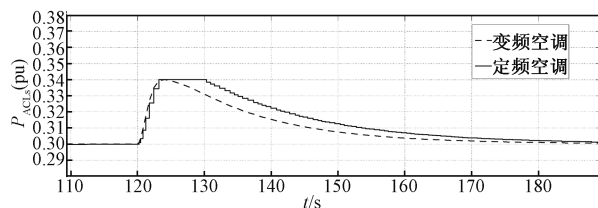


图 10 不同种 ACLs 的功率响应曲线

Fig.10 Power response curves of different ACLs

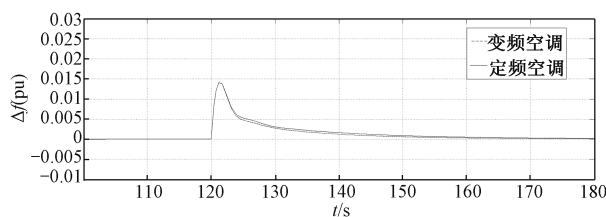


图 11 不同种 ACLs 的频率响应曲线

Fig.11 Frequency response curves of different ACLs

接下来分析不同量 ACLs 参与调频的情况, 对比研究当参与调频的 ACLs 负荷量为不同值时, 微网系统的调频效果。

图 12 是不同 ACLs 负荷量参与下的功率响应曲线, 由图可知, 随着 ACLs 负荷响应量的增加, ACLs 的响应速度也在一定程度上减小。由图 13 的频率响应曲线 (与图 12 相同线型曲线代表相同的 ACLs 负荷响应量) 可见, ACLs 负荷响应量的增加可在一定程度上减小系统频率的最大偏差, 降低超调, 但也会相应影响系统的频率调节速度, 使调节速度在一定程度上减慢。因此, 需要合理规划参与 DR 的 ACLs 负荷量, 以期获得更优质的调频效果。

#### 4.2.2 考虑风电及负荷随机性

在实际微网系统中, 风电功率会随风速、风向的变化产生突发性变化, 且负荷也时刻发生着随机波动<sup>[13,14]</sup>。为模拟微网内的这种随机波动, 本文通过

采用白噪声信号作为风电功率和负荷的输出来实现,其变化曲线如图 14 和图 15 所示。

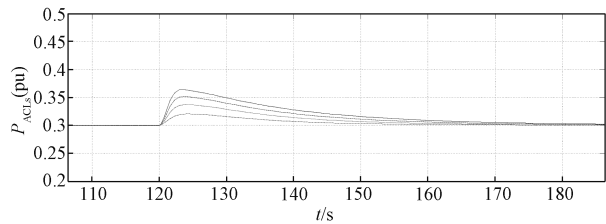


图 12 不同量 ACLs 的功率响应曲线

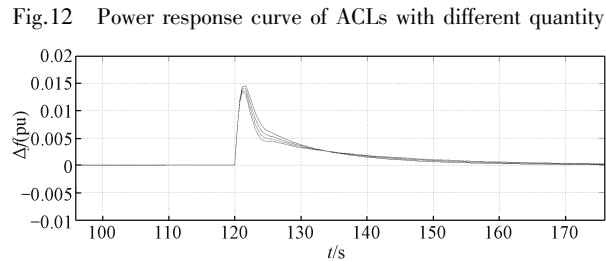


图 13 不同量 ACLs 的频率响应曲线

Fig.13 Frequency response curve of ACLs with different quantity

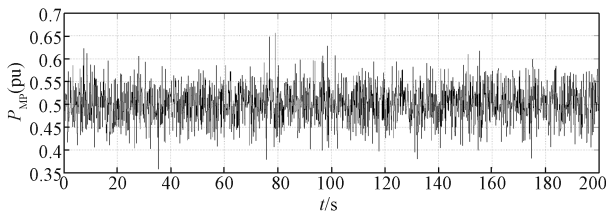


图 14 随机风电输出功率

Fig.14 Random wind power output

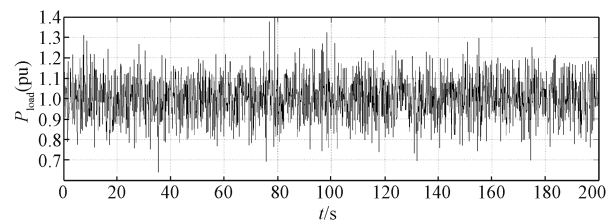


图 15 随机负荷

Fig.15 Random load

图 16 为考虑风电及负荷随机性的系统频率响应曲线。显然,在总体上,方案 1 频率的波动范围最大,其次是方案 2,方案 5 的波动范围最小。方案 4 的波动范围虽略小于方案 3,但其差别不大。这与阶跃扰动下得到的结论相似,表明在考虑风电和负荷随机性的情况下,HSS 与 ACLs 参与微电网调频依然可以改善系统的调频特性,且变论域模糊 PI 控制器相较于模糊 PI 控制器和 PI 控制器具有更好的控制性能。

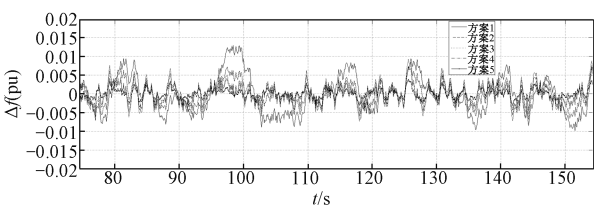


图 16 系统频率响应曲线

Fig.16 System frequency response curve

5 结论

本文提出了 ACLs 参与微网调频的变论域模糊 PI 控制策略。通过对 MT、HSS 发电特性的分析,建立了以 MT 为主调频机组,FC 为辅助调频机组,ES 和 ACLs 作为可控负荷以 DR 的形式参与微网调频的控制方案。仿真实验结果表明,本文所提控制策略对提高频率调节速度及降低超调作用显著,具有更好的调频效果。

参考文献 (References):

[ 1 ] 唐捷, 张泽宇, 程乐峰, 等 (Tang Jie, Zhang Zeyu, Cheng Lefeng, et al.). 基于 CE  $Q(\lambda)$  强化学习算法的微电网智能发电控制 (Smart generation control for micro-grids based on correlated equilibrium  $Q(\lambda)$  learning algorithm) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2017, 54 (1): 39-45.

[ 2 ] 李洪跃, 王锡淮, 肖健梅 (Li Hongyue, Wang Xihuai, Xiao Jianmei). 差分进化改进微电网负荷频率混合  $H_2/H_\infty$  鲁棒控制 (Differential evolution algorithm improving for micro-grid load frequency mixed  $H_2/H_\infty$  robust control) [J]. 电机与控制 (Electric Machines and Control), 2019, 23 (11): 118-126.

[ 3 ] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等 (Bao Yuqing, Li Yang, Wang Chunning, et al.). 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究 (On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (4): 32-37.

[ 4 ] 包宇庆 (Bao Yuqing). 需求响应参与电力系统调频机理及控制研究 (The mechanism and control of demand response in the frequency control of the power systems) [D]. 南京: 东南大学 (Nanjing: Southeast University), 2015.

[ 5 ] 张杰, 高广玲, 张智晟 (Zhang Jie, Gao Guangling, Zhang Zhisheng). 需求响应参与电力系统调频的模糊控制策略 (Fuzzy control strategy of demand response participating in power system frequency modulation) [J].



- 广东电力 (Guangdong Electric Power), 2020, 33 (3): 64-71.
- [6] He Hao, Sanandaji B M, Poolla K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (1): 189-198.
- [7] Wei Wenting, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Hierarchical and distributed demand response control strategy for thermostatically controlled appliances in smart grid [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5 (1): 30-42.
- [8] 徐青山, 吴泉, 杨斌 (Xu Qingshan, Wu Xiao, Yang Bin). 考虑状态差异性聚类的空调负荷直接负荷控制动态优化方法 (Dynamic optimization method of direct load control for air-conditioning load considering status diversity clustering) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (14): 33-42.
- [9] 陈斌, 王德林, 张俊武, 等 (Chen Bin, Wang Delin, Zhang Junwu, et al.). 双馈风电机组参与电网一次调频的多风速段综合控制及变参数整定 (Integrated control of multi-wind speed section and variable-parameter tuning on DFIG participating in primary frequency regulation of power grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 40-47.
- [10] 刘君, 穆世霞, 李岩松, 等 (Liu Jun, Mu Shixia, Li Yansong, et al.). 微电网中微型燃气轮机发电系统整体建模与仿真 (Overall modeling and simulation of microturbine generation systems in microgrids) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2010, 34 (7): 85-89.
- [11] 綦晓 (Qi Xiao). 基于多智能体系统及自抗扰控制理论的微网负荷频率控制策略研究 (Research on micro-grid load frequency control strategy based on multi-agent system and active disturbance rejection control algorithm) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2019.
- [12] Norford L K, Fuentes E, Kim Y. Experimental study of grid frequency regulation ancillary service of a variable speed heat pump [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31 (4): 3090-3099.
- [13] 张俊武, 王德林, 刘柳, 等 (Zhang Junwu, Wang Delin, Liu Liu, et al.). 基于变参数 PI 控制的双馈风电机组频率控制策略 (Control strategy of high penetrance wind power out of frequency regulation based on variable parameter PI control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (12): 9-17.
- [14] 刘林, 许晓艳 (Liu Lin, Xu Xiaoyan). 风电接入孤网后的频率控制策略 (Study of frequency control strategy after integration of wind power into isolated network) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (6): 49-53.

## Variable universe fuzzy PI control strategy of polymer frequency conversion air conditioning participating in micro network frequency modulation

ZHANG Jie<sup>1</sup>, HAN Ao-yang<sup>2</sup>, YU Li-tao<sup>2</sup>, ZHOU Sheng-qi<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-sheng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. State Grid Qingdao Electric Power Supply Company, Qingdao 266002, China)

**Abstract:** Aiming at the system frequency fluctuation caused by the active power imbalance in the micro-grid island operation mode, a variable-domain fuzzy PI control strategy with demand response and participation in frequency regulation of the micro-grid is proposed. By studying the power generation characteristics of various distributed power sources, a micro grid load frequency control model including micro gas turbines, hydrogen storage systems, wind power generation, and power loads is established. The micro gas turbines are mainly frequency-modulated units, and the hydrogen storage system assists in frequency modulation. Based on this, a variable-universal fuzzy PI control strategy for demand-response participation in frequency regulation of microgrids is studied with aggregate variable-frequency air conditioners as demand-side controllable load resources. The simulation experiment results show that by using this strategy there is a significant effect on increasing the frequency adjustment speed and reducing overshoot, and it is more suitable for the timeliness and accuracy requirements of micro grid frequency modulation, which is helpful to improve the frequency regulation performance of micro grid.

**Key words:** demand response; distributed power; micro grid; variable universe fuzzy PI control; frequency regulation