

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-688-08

考虑决策边界的微电网供冷系统能量分配策略

徐兰静 陈 淼 苏 华 秦铭远

(西华大学 成都 610039)

【摘 要】 在高温高湿的低纬度岛礁地区, 室内环境全年大部分时间需要供冷, 更加经济有效的能源系统能量调度策略非常关键。为满足低纬度岛屿建筑的全年供冷需求, 提出一种考虑决策边界的两阶段模糊控制的微电网多能源能量分配控制策略。依据蓄电池和柴油发电机的实际运行特性, 得出最优的决策边界, 进而得到了更加客观的两阶段模糊控制器。综合考虑二者可能的需求功率与实时状态, 决定不同情形下蓄电池和柴油机的功率分配, 实现能量最佳流动, 降低系统运行成本。仿真实验验证了所提控制策略的有效性。考虑决策边界的两阶段模糊控制比未考虑决策边界的模糊控制策略节约成本 14.15%, 比未采用模糊控制的调度策略节约成本 20.45%。与此同时, 获得了最小的 LPSP, 0.72%, 最大程度上实现了冷电协同。对风光互补系统在孤立地区的应用与推广有一定的积极作用。

【关键词】 柔性分配策略; 两阶段模糊控制; 微电网; 决策边界

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Energy Allocation Strategy Considering Optimal Decision Boundaries in a Microgrid-Cooling System

Xu Lanjing Chen Miao Su Hua Qin Mingyuan

(Xihua University, Chengdu, 610039)

【Abstract】 The study presents a flexible allocation strategy based on two-stage fuzzy logic controller (FLC) for a microgrid-cooling system on low-latitude islands. The decision boundaries (DB) are optimized according to actual operating characteristics of the battery and diesel generator (DG), and the obtained FLC is more objective. Power allocation is determined by their real-time demand and state under different conditions to realize the optimal energy flow (OEF), thus improving the system's reliability and economy. The variation trends of DB are predicted for possible future scenarios. A case study is used to verify the effectiveness of the proposed control strategy. The two-stage FLC considering DB (FLC-DB) saves 14.15 % of the operating cost compared to the FLC that does not consider DB (FLC-NDB), and it saves 20.45% when compared to the scheduling strategy without fuzzy control. At the same time, its loss of power supply probability (LPSP) is the smallest, which is only 0.72%. The synergy between the power supply and cooling demand is achieved to greater extent. The energy management system (EMS) has a positive effect on the application and promotion of wind-solar complementary systems in isolated areas.

【Keywords】 Flexible allocation strategy; Two-stage fuzzy logic controller; Microgrid; Decision boundaries

0 引言

世界上近 20% 人口 (13 亿) 缺乏电力供应, 许多人生活在与电网连接不经济或不实用的偏远

地区^[1]。在高温高湿的低纬度岛礁地区, 室内环境全年大部分时间需要供冷, 且冷需求非常大。对于远离公共电网但风光资源丰富的孤岛地区, 供冷的

项目基金: 西华大学人才引进项目 (Z212055)

作者 (通讯作者) 简介: 徐兰静 (1991.01-), 女, 博士, 讲师, E-mail: zilanxlj@163.com

收稿日期: 2025-07-01

最佳电力来源无疑是微电网。风力发电、光伏发电是最重要的两种形式。由于风能和太阳能对季节气候的依赖性较强, 普遍存在不可调性和随机波动性, 所以风能和太阳能电源在供电时极易在某一时段出现与供冷需求不匹配的情况。储能系统可以存储多余能量并在能量匮乏时释放, 一定程度上弥补了风电、光电的随机性和间歇性等缺点^[2]。对于含储能的新能源发电系统, 通常会加入柴油发电机作为应急电源, 增强系统的供能可靠性。

孤岛模式下的微电网与并网模式下的主要区别在于, 只有加入了柴和蓄才可以实现自给自足。然而, 对于运营成本, 单位每度电的蓄电成本与柴油机发电成本要远远高于风电与光伏成本。这将大大影响和制约该混合能源系统在孤立地区的推广及应用。因此, 更加经济有效的能量调度策略非常关键。优先考虑利用风电和光电的电能, 其控制策略比较简单^[3]。但是, 对于蓄电池和柴油发电机的控制策略就相对复杂, 这也是从蓄电池和柴油发电机的运行特性与功能出发的^[4]。减少燃料消耗和降低蓄电池运行成本是微电网能量管理系统 (EMS) 中两个相互矛盾的目标。

早期研究中, 未考虑两者运行费用的矛盾。如 Musgrove^[5]的研究中, 各种情况下的优先级是固定的, 即风光蓄柴, 较为主观与机械, 运行成本未得到优化。此后的研究中, 仅考虑了其中一个可控单元的运行经济性。在考虑其中一个可控单元运行性能及其经济性的同时, 忽略了另一可控单元的运行状况。这将导致寿命损耗以及整体运行成本的增加。如 Barley 和 Winn^[6]仅讨论了用柴油机对蓄电池充电的经济性, 比较了多种备用模式, 以确定调度策略。Tazvinga 等人^[7]针对 PDB 混合能源系统, 仅考虑了蓄电池维护费用时的最佳能量调度策略, 使得系统可靠经济地运行。近几年的研究中, 虽然两者皆考虑, 但没有在最初环节考虑净负载的柔性分配与协调, 不同情形下对于两个可控单元的调度非此即彼。如 Chalise 等人^[8]将最小化燃料消耗和电池退化成本的目标结合到单个加权目标中。但各情形下 EMS 的调度只安排和控制发电机的启停和电池的充放电。运行成本有所降低, 但效果有限, 且调度控制方法在实际中难以操作。

前人研究未能解决减少燃料消耗和降低蓄电池运行成本的矛盾。本文选择采用两阶段模糊控

制, 它可以很好的实现净负载在柴、蓄间的柔性分配与协调。由于具有自适应性和鲁棒性, FLC 可以灵活处理不同类型且不可预测的变量 (如可再生能源供电与负载消耗) 及分配策略的不确定性^[9], 保证了对气候变化和负荷需求实时跟踪与响应。

传统规则库的建立往往依赖于专家知识, 即凭经验进行柔性分配, 具有很强的主观性。净负载分配比例以及模式判别边界的主观性, 将造成判定条件区间的扩大或缩小以及模式的误判等。资料显示, 很少有研究针对设备本身的转化与运行经济特性考虑规则库中决策边界的优化。而重要决策边界的计算、优化和讨论, 恰恰是制定并优化模糊控制规则的关键理论依据。本文依据两个主控单元的实际运行特性, 推论并优化了四个重要决策边界, 克服了传统规则库的主观性。提出的两阶段模糊控制, 实现了在兼顾燃油经济性的同时, 将蓄电池 SOC 控制在最佳运行区间, 进一步减少了总运行成本。控制策略简单易行, 自适应性强, 不仅提高了系统运行的经济性, 还提高了供冷保证率。这将有利于风光互补系统在孤立地区的推广与应用。

1 微电网供冷系统的描述

微电网-供冷系统拓扑结构如图 1 所示。基于 FLC 的 EMS 是系统的核心控制单元, 是实现能量分配策略的载体。系统控制信号流如图 2 所示。净负载 ΔP 代表可用风电、光电之和与制冷机组运行电耗之间的差异。由控制器 1 分配蓄电池需要承担的部分, 余下的二级电力缺口由柴油机补足, 补足量与柴油机对蓄电池的充电情况由控制器 2 判断和控制。当净负载 $\Delta P \leq 0$ 时, K_{bat} 为蓄电池充电量与可再生能源发电盈余电量的比值; 当净负载 $\Delta P > 0$ 时, K_{bat} 为蓄电池放电电量与净负载的比值, 即蓄电池分配的净负载的比例。当净负载 $\Delta P \leq 0$ 时, 使用可再生能源为供冷系统供电, 当满足供冷系统净负载需求时, 将剩余的可再生能源能量为蓄能设备充电。在充电过程中控制蓄能设备电量不超过其本身限定的最大蓄电状态 SOC_{max} ; 当 $\Delta P > 0$ 、且蓄能设备的蓄电状态为 $SOC > SOC_{low}$, 使用蓄能设备为供冷系统供电, 当满足供冷系统净负载需求或者蓄能设备的蓄电状态为 SOC_{low} 时, 停止为供冷系统供电, 得到蓄能设备在该供电过程中的放电量和经过供电后的电量; 基于放电电量判断是否存在二级

电力缺口 $\Delta P'$ ，若 $\Delta P \leq 0$ ，柴油机不启动；若 $0 < \Delta P \leq L_c$ ，且蓄能设备放电后的蓄电状态 $SOC(t) < SOC_{high}$ 时，启动柴油机为供冷系统供电，当满足供冷系统 $\Delta P'$ 时，将柴油机剩余电量为蓄能设备充电，在充电过程中控制蓄电池状态不超过 SOC_{high} ；当 $\Delta P > L_c$ 时，直接启动柴油机补足 $\Delta P'$ ，不对蓄电池进行循环充电。特别地，当柴油机的运行费用与蓄能设备的调度成本存在交集时，净负 ΔP 存在临界负载 L_d 。当 $0 < \Delta P \leq L_d$ 时，使用蓄能设备为供冷系统供电；当 $\Delta P > L_d$ 时，启动柴油机为供冷系统供电。控制器的设计流程如图 2 所示。各变量的计算公式如式 (1) - (4) 所示。能量分配过程如图 3 所示。

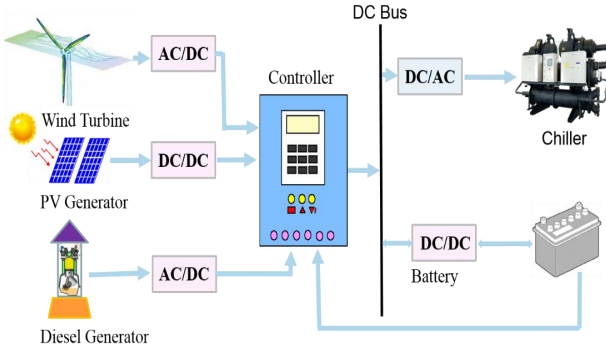


图 1 微电网供冷系统拓扑结构图

Fig.1 Topological structure of the microgrid-cooling system

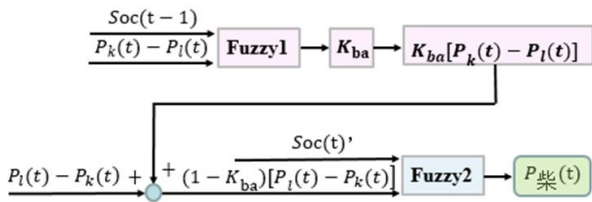


图 2 系统控制信号流

Fig.2 System control signal flow

$$\Delta P = P_L(t) - P_{RE}(t) \quad (1)$$

$$SOC(t) = \frac{P_{bat}(t-1) + K_{bat}[P_{RE}(t) - P_L(t)] + \{P_{DG}(t) - (1 - K_{bat})[P_L(t) - P_{RE}(t)]\}}{P_e} \quad (2)$$

$$SOC(t)' = \frac{P_{bat}(t-1) + K_{bat}[P_{RE}(t) - P_L(t)]}{P_e} \quad (3)$$

$$\Delta P' = (1 - K_{bat})[P_L(t) - P_{RE}(T)] \quad (4)$$

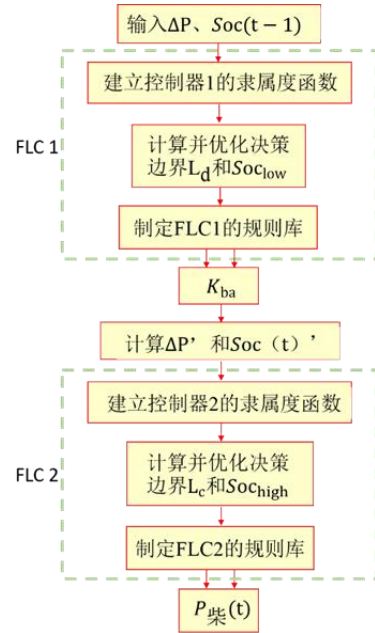


图 3 控制器的设计流程

Fig.3 Design process of controller

2 决策边界

2.1 可控单元的运行费用

可控单元的成本包括电池/柴油机的运行成本和循环充电的能量成本。

(1) 蓄电池运行费用

蓄电池运行费用主要指的是替换费用。蓄电池的循环寿命一般用蓄电池失效循环次数来表示。蓄电池失效循环次数 N_c 与放电深度 DOD 的关系如图 4 所示。

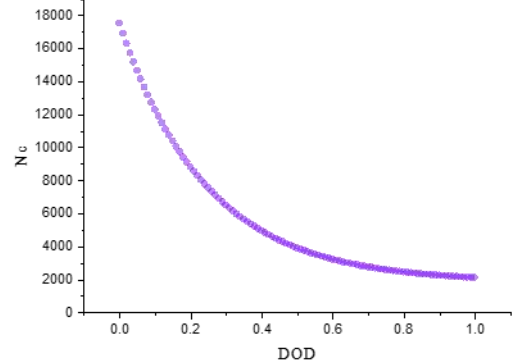


图 4 蓄电池寿命期循环次数

Fig.4 Maximum number of battery cycles

对某一放电深度 DOD ，其等效的最大循环次数为^[10]：

$$N_c = a_1 + a_2 e^{a_3 D} - a_4 e^{a_5 D} \dots \quad (5)$$

式中： $a_1, a_2, \dots, a_5, \dots$ 为蓄电池的特征参数。

当该式取前两项时可以得到较好的效果。如图4所示,拟合后得: $a_1=1789$, $a_2=1.573 \times 10^4$, $a_3=-4.038$ 。

则蓄电池第 j 次充放电深度为 DOD 时的寿命损耗成本如式(6)所示^[11]。

$$C_j = \frac{C_{\text{initial-bat}}}{N_c} \quad (6)$$

一个调度周期内,蓄电池的调度成本(\$/kWh)如式(7)所示。

$$C_{bw} = \frac{\sum_{j=0}^{N_T} C_j}{\sum_{j=0}^{N_T} |\Delta P_{bat}|} \quad (7)$$

式中: N_T 为调度周期内蓄电池充放电次数。

(2) 柴油机运行费用

柴油机燃料消耗可被描述为如式(8)所示。

$$D_f(t) = \alpha_D P_{DG}(t) + \beta_D \times P_{Dr} \quad (8)$$

式中: $D_f(t)$ 为柴油机逐时燃料消耗; P_{DG} 为 DG 的发电功率, kW; P_{Dr} 为 DG 的额定功率, kW; α_D 和 β_D 为燃料消耗曲线的系数, 分别取为 0.2461L/kWh 和 0.084151L/kWh^[12]。故而, 柴油机发出 1kWh 电能的油耗费用如式(9)所示。

$$C_g = \frac{D_f(t) C_f}{P_{DG}} = C_f \left(\alpha_D + \frac{\beta_D \times P_{Dr}}{P_{DG}} \right) \quad (9)$$

式中: $C_f=9.00/\text{gallon}$ ^[16], 即\$2.38/L。柴油机寿命一般为 20000h^[13], 故机器折损费(\$/kWh)如式(10)所示。

$$C_{Dw} = \frac{\frac{M_T}{20000} C_{\text{initial-DG}}}{\sum_{t=0}^{M_T} P_{DG}(t)} \quad (10)$$

式中: M_T 为调度周期内柴油机运行小时数; $C_{\text{initial-DG}}$ 为柴油机购买价格。 C_g 随负载变化曲线如图5所示。当输出功率增加时, C_g 减少; 当输出功率减少时, 特别是趋向轻载时, C_g 迅速增加。

(3) 循环充电能量费用

柴油机为循环充电额外发出的每 kWh 电能的费用 C_a 如式(11)所示。

$$C_a = \frac{\alpha_D C_f}{\eta} \quad (11)$$

式中: η 为蓄电池充放电效率, 取 0.95; C_a 与蓄电池消耗费用的和定义为循环能量费用 C_{cycle} , 即:

$$C_{\text{cycle}} = C_{bw} + C_a \quad (12)$$

2.2 决策边界

(1) 临界负载

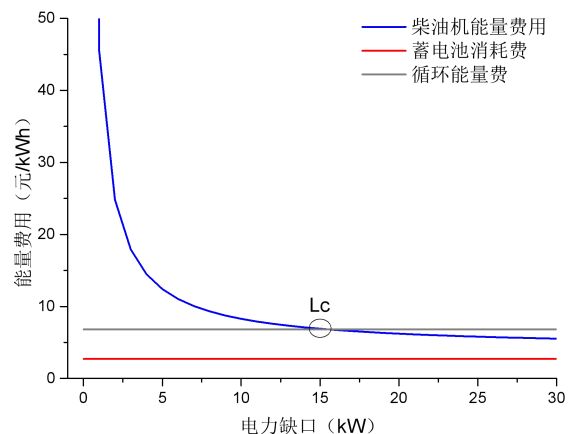


图5 能量费用与临界负载

Fig.5 Energy dispatching cost and critical load

柴油机能量费用曲线与蓄电池的调度成本曲线的交点所对应的临界负载 L_d , 是 Fuzzy1 的决策边界之一。当净负载大于 L_d 时, 柴油机能量费用较蓄电池能量费用要小。此时, 使用柴油机组发出的电能来满足负载的需要更经济。相反, 当净负载小于临界负载时, 蓄电池的能量费用比柴油机的能量费用小, 使用蓄电池的能量来满足净负载需求更为经济。当 C_{bw} 太小时, C_{bw} 曲线与 C_g 曲线将不会有交点。实际物理意义是任何负载情况下, 使用蓄电池的能量比使用柴油机发出的能量都要经济。

蓄电池循环能量费用与柴油机费用曲线的交点所对应的负载即为循环充电的参考临界负载 L_c , 是 Fuzzy2 的决策边界之一。当二级电力缺口大于 L_c 时, 启动柴油机直接提供能量给负载; 当二级电力缺口小于 L_c 时, 循环充电将更加经济。启动柴油机, 使其运行在较大功率点下, 既能满足二级电力缺口, 剩余的给蓄电池充电。为防止柴油机能量溢出, 较大而非额定功率运行, 视情况而定。

(2) 控制器 1、2 中 SOC 上下限的确定

由公式(5)与(6)可以看出, 蓄电池运行成本与 DOD 成正比, 而 $SOC=1-DOD$, 所以 SOC 与蓄电池运行成本成反比; 除自然资源条件良好的情景下, 维持 SOC 在较高区间需要付出柴油机燃料消耗。综上, 控制器 1 蓄电池放电下限 SOC_{low} 和控制器 2 充电上限 SOC_{high} 直接影响了年运行成本。因此, 蓄电池 SOC 除了有上下限约束之外, 还需确定其最佳运行区间 $[SOC_{low}, SOC_{high}]$ 。如图 6 所示, 蓄电池需维持的最佳运行区间为 0.55-0.75。

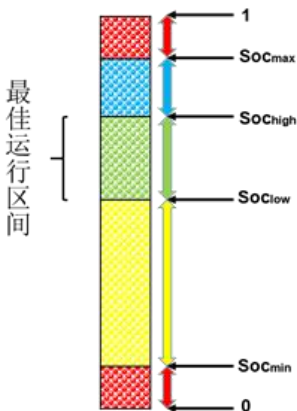


图 6 蓄电池运行区间

Fig.6 Battery operating range

3 能量分配策略的模糊控制器设计

3.1 决策边界

依据大量的实验数据和理论分析设定了净负载、电池 SOC 等变量的隶属度函数，如图 7 所示。隶属度函数模糊子集的符号表如表 1 所示。

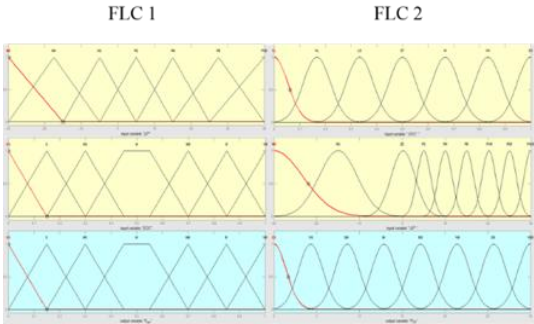


图 7 隶属度函数

Fig.7 The membership functions

表 1 模糊子集符号

Table 1 Symbol table of the fuzzy subset

VS	Very small	S	Small
MS	Middle small	M	Middle
MB	Middle Big	B	Big
VB	Very Big	NB	Negative Big
NM	Negative Middle	NS	Negative Small
PS	Positive Small	PM	Positive Middle
PB	Positive Big	PVB	Positive Very Big
EL	Extraordinary Low	VL	Very Low
LO	Low	ST	Standard
HI	High	VH	Very High
EH	Extraordinary High	ZE	Zero
PVEB	Positive Very Extraordinary Big	ES	Extraordinary Small
SM	Small Middle	MI	Middle
BG	Big	EB	Extraordinary Big
VEB	Very Extraordinary Big		

3.2 规则库的建立

依据第二部分对决策边界的讨论，该节制定并优化了控制器 1、2 的控制规则表。模糊控制器 FLC 1 控制策略如下：当 SOC 适中（0.55–0.75）时，蓄电池按指令正常充放电。当 SOC 偏小（0.1–0.55）且准备放电、 SOC 偏大（0.75–0.9）且准备充电时，基于模糊理论对其 SOC 进行控制，输出修正系数 K_{bat} ，进而计算修正后的蓄电池充放电功率。

FLC 1 的规则库如表 2 所示。

表 2 FLC 1 的控制规则表

Table 2 The rules base of FLC 1

ΔP	K_{bat}						
	$SOC=VS$	$SOC=S$	$SOC=MS$	$SOC=M$	$SOC=MB$	$SOC=B$	$SOC=VB$
NB	VS	VS	VS	VS	MS	M	MB
NM	VS	VS	VS	VS	M	MB	VB
NS	VS	VS	VS	VS	MB	VB	VB
PS	VB	VB	VB	VB	VB	MS	VS
PM	VB	VB	VB	VB	MB	S	VS
PB	VB	VB	VB	MB	M	S	VS
PVB	VB	B	MB	M	MS	VS	VS

修正后的蓄电池放电指令与原始放电指令的差值即剩余的电力缺口（二级电力缺口）将由柴油机承担。模糊控制器 FLC 2 控制策略如下：二级电

力缺口小于等于 0，即能量有盈余或者无电力缺口时，柴油发电机不启动二级电力缺口在 0 到 15 之间且 $SOC(t)$ 小于 75% 时，启动柴油发电机补足电

力缺口,并为蓄电池充电,但不得大于75%。二级电力缺口在0到15之间且 $SOC(t)$ 大于75%时,启

动柴油发电机补足电力缺口。二级电力缺口在15到30之间时,启动柴油发电机跟踪二级电力缺口。FLC 2的规则库如表3所示。

表3 FLC 2的控制规则表

Table 3 The rules base of FLC 2

$\Delta P'$	$P_{DG}(t)$						
	$SOC'=EL$	$SOC'=VL$	$SOC'=LO$	$SOC'=ST$	$SOC'=HI$	$SOC'=VH$	$SOC'=EH$
NB	ES	ES	ES	ES	ES	ES	ES
NS	ES	ES	ES	ES	ES	ES	ES
ZE	ES	ES	ES	ES	ES	ES	ES
PS	VEB	VEB	EB	BG	SM	ES	ES
PM	VEB	VEB	VEB	VB	MI	SM	ES
PB	VEB	VEB	VEB	EB	BG	SM	ES
PVB	VB	VB	VB	VB	VB	MI	SM
PEB	EB	EB	EB	EB	EB	BG	MI
PVEB	VEB	VEB	VEB	VEB	VEB	EB	BG

4 评价指标

(1)性能:蓄电池荷电状态 SOC 在较佳范围。 SOC 是电池剩余容量与额定容量的比,定义如式(2)所示。

(2)系统安全性:失电率 $LPSP$ 最小。

$$LPSP = \sum_{t=1}^T LPS / \sum_{t=1}^T P_L \quad (13)$$

$$LPS = P_L - (P_{PV} + P_{WT} + P_{DG} + P_{bat}) \quad (14)$$

(3)系统年运行费用最小。

$$C_{total} = \sum_{j=0}^{N_T} C_j + \sum_{j=0}^{M_T} [C_f(\alpha_D P_{DG}(t) + \beta_D \times P_{Dr}) + C_{Dw}] \quad (15)$$

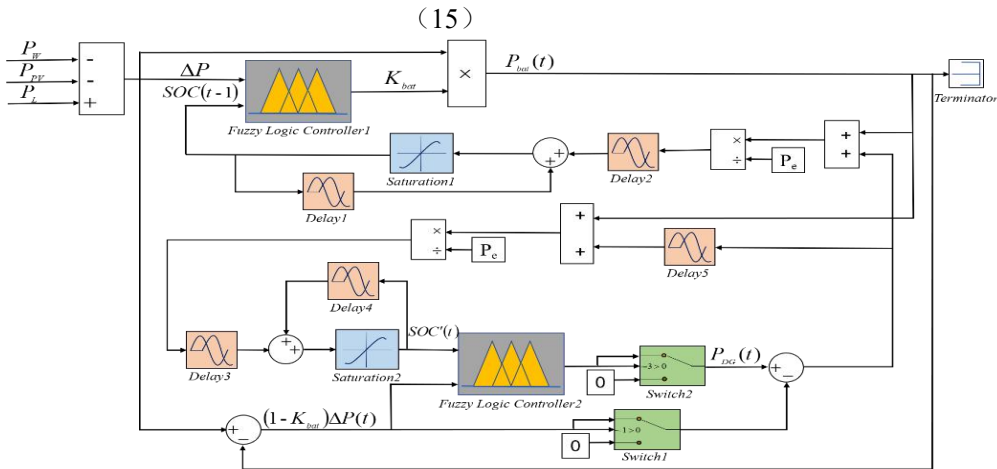


图8 隶属度函数

Fig.8 System simulation diagram

在典型日,7月8日和9日,对微电网供冷系统的运行性能进行了分析。这两天处于枯风季,但天气炎热,冷负荷很大。当采用固定优先级(FP)策略时,电池仅放电8小时。因为没有柔性分配净负载,

5 结果与讨论

为了评估该策略的性能,将所提出的方法与其他两种方法进行比较。第一种方法是基本情况,未采用模糊控制,调度优先级是固定的。第二种方法中,主控单元的功率输出由FLC控制,但未讨论和优化决策边界。第三种方法是本文提出的考虑决策边界的两阶段FLC。在Matlab/Simulink平台上测试和验证了三种调度控制策略。系统仿真图如图8所示。

蓄电池大多数时候, SOC 处于0.1的状态,无法提供能量。在第6-7h,7-30h和44-45h的时间段,几乎没有风能和太阳能资源,同时电池没有放电能力。冷负荷完全由运行成本最高的柴油机承担。

当采用无决策边界的两阶段模糊控制 (FLC-NDB) 时, 电池在更多时间内与柴油机共同承担净负载。这是因为模糊控制策略协调两个主控单元需要提供的净负载, 而不是首先将电池放电直到其技术下限。然而, 在方法 2 的 FLC 中没有考虑决策边界, 会造成很多模式切换以及判断条件区间的误判, 这将导致 EMS 无法兼顾柴油机的经济运行特性和 SOC 的最佳运行范围。因此, 不可能最大化电池的平衡效果, 使得其在下一时刻被调度的潜力不是最佳的。SOC 处于中等水平。此外, 燃油效率也不是最优的。该系统需要更多的电池调

度成本, 导致总运营成本的增加。

为了改进 FLC-NDB, 讨论并优化了决策边界, 采用了考虑决策边界的两阶段模糊控制 (FLC-DB)。这将使得净负载在两个主控单元之间被最佳分配。电池 SOC 保持在最佳范围内, 且燃油效率得以提升。因为基于主控单元的实际运行特性来考虑的决策边界, FLC 控制效果得以提升。更加精确的切换边界使得不同运行模式的判别更加科学合理, 避免了判定条件区间的扩大或缩小以及模式的误判。由于取得最优决策边界, 电池 SOC 始终保持在最佳范围内, 且燃油效率得以提升。

表 4 不同方法年度运行结果

Table 4 Annual operational results in each method

方法	SOC_{ave}	柴油机成本/(\$/year)	电池成本/(\$/year)	总成本/(\$/year)	LPSP/%
1	0.51	23022.55	20224.51	43247.06	1.41
2	0.62	24154.81	15921.63	40076.44	0.95
3	0.79	25220.53	9184.48	34405.01	0.72

表 4 总结了年度运行结果。总体而言, 各方法 SOC 均值 0.51、0.62、0.79, 考虑决策边界的 FLC 策略中蓄电池 SOC 的 LPSP 最高, 有利于维持其健康状态, 延长其寿命。考虑决策边界的 FLC 策略比 FLC 策略总运行成本降低了 14.15%, 比固定优先级策略降低了 20.45%。此外, 考虑决策边界的 FLC 策略的 LPSP 最小, 这意味着该方法提供更高的安全性和可靠性, 最大程度上实现了冷电协同。

6 结论

本文采用混合动力组成的微电网驱动供冷系统连续运行, 为低纬度偏远岛屿上的住宅供冷。本文所提出的基于两阶段模糊控制算法的能量分配策略, 用于协调分配蓄电池与柴油发电机的能量流动, 得出的主要结论如下:

(1) 经过优化后的基于两阶段模糊控制的 EMS, 在经济性、安全性上均体现出优势。比没有考虑决策边界的 FLC 节省了 14.15% 的运行成本, 比没有 FLC 的 EMS 节省了 20.45%, 并且很好地实现了冷电协同;

(2) 决策边界对于模糊控制规则的制定与控制效果影响很大, 需要进行计算、讨论。控制规则库将随决策边界的变化而改变, 可据此得到优化, 从而得到更有效的调度策略;

(3) 本文提出的 EMS 由于其自适应性而具有

良好的灵活性, 可以应对不同的天气变化, 且可被应用于其他领域, 如海水淡化、电动汽车等。

该研究提供了与微电网联合供冷系统在能量分配与管理策略的见解。结果证实, 设计合理的 EMS 可以更加经济高效得满足不同情形下的用能需求。在未来的工作中, 将基于化石能源价格、蓄电池价格与性能的未来发展趋势, 建立其预测模型, 并将该预测模型代入文中模糊控制决策边界的计算与讨论中。目的在于找出决策边界在时间尺度上的具体移动规律, 即不确定因素的预测模型对决策边界的影响机制。此外, 其他能量储存形式, 例如抽水蓄能和储氢, 将被添加到混合能源系统中。

参考文献:

- [1] McHenry M P. Why are remote western Australians installing renewable energy technologies in stand-alone power supply systems?[J]. Renewable Energy, 2009, 34(1):1252-1256.
- [2] Pelland S, Turcotte D, Colgate G, et al. Nemiah Valley Photovoltaic-Diesel Mini-Grid: System Performance and Fuel Saving Based on One Year of Monitored Data[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012,3(1): 167-175.
- [3] Dincer H, Yuksel S. Multidimensional evaluation of global investments on the renewable energy with the

- integrated fuzzy decision-making model under the hesitancy[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018,43:1775-1784.
- [4] Abdorreza R, Mohammad S, Jamshid A, et al. Optimal operation of microgrids through simultaneous scheduling of electrical vehicles and responsive loads considering wind and PV units uncertainties[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,(57):721-739.
- [5] Musgrove A. The optimization of hybrid energy conversion systems using the dynamic programming model RAPSODY[J]. *International Journal of Energy Research*, 1988,12:447-457.
- [6] Barley C D, Winn C B. Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems[J]. *Solar Energy*, 1996,58(4-6):165-179.
- [7] Tazvinga H, Xia X, Zhu B. Optimal Energy Management Strategy for Distributed Energy Resources[J]. *Energy Procedia*, 2014,61:1331-1334.
- [8] Chalise S, Sternhagen J, Hansen T M, et al. Energy management of remote microgrids considering battery lifetime[J]. *Electricity Journal*, 2016,29(6):1-10.
- [9] Sezer S, Cetin S, Atalay A E. Application of Self Tuning Fuzzy Logic Control to Full Railway Vehicle Model[J]. *Procedia Computer Science*, 2011,6:487-492.
- [10] Vrettos E I, Papathanassiou S A. Operating policy and optimal sizing of a high penetration res-bess system for small isolated grids[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011,26(3):744-756.
- [11] 沈玉明,胡博,谢开贵,等.计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行[J].*电网技术*,2014,(9):2371-2378.
- [12] Mohamed A Mohamed, Ali M Eltamaly, Abdulrahman IA. Sizing and techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery power generation systems[J]. *Renewable Sustainable Energy*, 2015,063128.
- [13] 朱永.微电网能源调度管理与优化运行研究[D].镇江:江苏科技大学,2017.

(上接第638页)

参考文献:

- [1] 王正辉,朱彤.地板下送风数据机房的气流组织优化研究[J].*机电产品开发与创新*,2025,38(3):179-181.
- [2] 高远,黄翔,褚俊杰,等.蒸发冷却(凝)技术应用及前景分析[J].*制冷与空调*,2025,25(4):11-14.
- [3] 黄翔,李潼,褚俊杰.算力时代数据中心液冷与蒸发冷的融合发展[J/OL].*制冷与空调*, <https://link.cnki.net/urlid/11.4519.tb.20250327.1407.002>.
- [4] 杨柳,黄翔,武苗苗,等.直接蒸发冷却技术在渭南地区数据中心的应用[J].*制冷与空调*,2023,23(8):30-33.
- [5] 刘凯磊,黄翔,杨立然,等.蒸发冷却空调系统在数据中心的应用实验[J].*暖通空调*,2017,47(12):124-130.
- [6] 徐娟.间接蒸发冷却技术在洞库式数据中心的应用[J].*建材发展导向*,2025,23(11):40-42.
- [7] Sun P, Wang X, Kong J, et al. Multi-objective optimization of y-type fin structure in rectangular phase change energy storage units for thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025,276.
- [8] 吕冠潮.与气候条件匹配的蒸发制冷除湿空调系统设计与性能研究[D].昆明:云南师范大学,2024.
- [9] Barone G, Buonomano A, Forzano C, et al. An innovative waste heat recovery solution for hvac systems in railway coaches: a path to enhanced energy efficiency[J]. *Energy Reports*, 2025,13:5653-5661.
- [10] 韩新月.数据中心冷却系统一三维建模及节能策略研究[D].北京:华北电力大学,2024.
- [11] 杨千,胡国辉,刘心悦,等.Lng船舱预冷喷淋过程中的多物理场耦合研究进展[J].*中国造船*,2025,66(2):258-279.
- [12] 张燕斌,支安东,张立峰.旋风除尘器与喷雾塔联合应用的干燥工艺优化研究[J].*中国设备工程*,2024,(22):102-104.
- [13] 梁睿.建筑暖通空调系统的节能改造[J].*居业*,2025,(5):249-251.
- [14] 吴兴洋,严小冬,支亚京,等.贵阳近百年气候变化及干湿演变[J].*山地气象学报*,2024,48(4):56-64.
- [15] 张春辉,徐鹏.贵阳市相对湿度及PM_{2.5}浓度对大气能见度的影响分析[J].*环保科技*,2022,28(1):23-26.
- [16] 王晨平,魏俊旗,吴玲,等.贵阳某数据中心多种空调形式的应用分析[J].*暖通空调*,2024,54(2):131-136.
- [17] 董凯军,李平界,吕太,等.基于自然冷源应用的数据中心节能潜力研究[J].*可再生能源*,2017,35(9):1411-1416.