

# 电—热联合微网中基于波动参数的多类型储能协同控制

赵建勇<sup>1</sup>, 张震霄<sup>1</sup>, 康 钧<sup>2</sup>, 赵文强<sup>2</sup>, 余紫薇<sup>1</sup>, 雷国斌<sup>2</sup>, 周 军<sup>2</sup>

(1. 浙江大学浙江省电机系统智能控制与变流技术重点实验室, 浙江 杭州 310027;  
2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810008)

**摘 要:**针对光伏发电的功率波动和消纳问题,结合中国西北地区供电供热需求,以光伏、热泵和混合储能组成的电—热联合微网为研究对象,研究了基于波动参数的多类型储能协同控制。首先,分析电—热联合微网的特点及能量转换方式。然后,设计电—热联合微网中基于波动参数的多类型储能双层协同控制策略,在上层控制中,基于功率波动时间尺度以及变参数的低通滤波方法,提出多类型储能协同平抑功率波动策略;在下层控制中,基于混合储能平抑功率波动以及微网电压、频率机理,提出混合储能能量转移的自适应控制策略。最后,通过仿真算例对所提算法进行验证,仿真结果表明:所提方法可以在有效减少电储能投资成本的前提下充分抑制可再生能源的功率波动,并延长混合储能的使用寿命,具有良好的应用前景。

**关 键 词:**协同控制;电—热联合微网;混合储能;变参数

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.019 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2023)01-0164-07

## Multi-type energy storage collaborative control based on wave parameters in microgrids with combined heat and power system

ZHAO Jianyong<sup>1</sup>, ZHANG Zhenxiao<sup>1</sup>, KANG Jun<sup>2</sup>, ZHAO Wenqiang<sup>2</sup>,  
YU Ziwei<sup>1</sup>, LEI Guobin<sup>2</sup>, ZHOU Jun<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

**Abstract:** To deal with the power fluctuation and the consumption of photovoltaic power generation with the premise of the demand of power supply and heating in northwest China, this paper studies the collaborative control of multi-types of energy storage based on fluctuation parameters by taking the electric-thermal joint micro-network composed of photovoltaic, heat pump and hybrid energy storage as the research object. Firstly, the characteristics and energy conversion mode of electro-thermal joint microgrid are analyzed. Then, a two-layer collaborative control strategy of multi-type energy storage based on fluctuation parameters is designed for the electro-thermal joint micro-grid. In the upper layer, a strategy of multi-type energy storage collaborative power fluctuation suppression is proposed based on the time-scale of power fluctuation and the low-pass filtering method with variable parameters. In the lower layer, an adaptive control strategy for energy transfer of hybrid energy storage is proposed based on the requirement of the power fluctuation suppression and the mechanism of voltage and frequency in microgrid. Finally, the proposed algorithm is verified by simulation. The simulation results show the proposed method can suppress the power fluctuation of renewable energy and can extend the battery life on the premise of reducing the investment cost of electric energy storage effectively.

**Key words:** collaborative control; microgrid with combined heat and power system; hybrid energy storage system; variable parameter

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2021-05-19

基金项目: 国网青海省电力公司科技项目(106000003069); 浙江省教育厅科研项目(Y202045591)

通信作者: 张震霄(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源并网技术控制研究; E-mail: 2990819136@qq.com

电—热联合微网是考虑到终端用户的用电、用热需求,互补利用传统能源和新能源的一体化集成供能基础设施。联合微网继承了能源互联网中多网耦合的思路,将电能与热能耦合,通过储能技术、能量管理技术和协同控制技术等为用户提供电—热 2 种形式的能源供应。电—热两者具有天然的互补特性,可以实现 2 种能源形式的协同供应与综合梯级利用<sup>[1]</sup>。

电—热联合微网中,能量的存储介质不再局限于蓄电池、超级电容,还包括大容量的储热设备。多类型不同存储介质的混合储能及能源转换为可再生能源的消纳与平抑波动提供了更加灵活的调节方式和解决方案。电—热联合微网通过对电能和热能的联合协同控制,可以有效地优化电储能的容量配置,降低系统的整体投资成本。所述解决方案可以提高分布式可再生能源的消纳能力,也为行业内存在的弃风弃光问题提供新的解决思路。

目前,科研院所对电—热联合微网的优化运行、协调控制和联合调度等进行了大量的研究,文献[2]研究热电联合微网的经济优化问题,考虑因素主要是新能源的随机波动特性;文献[3]考虑风电机组随机波动的特性,对系统建模、优化的影响。并且还有学者对冷—热—电三联供系统中多能流的优化调度问题进行研究。文献[4]以电—热市场为背景,建立电力网和热力网联合调度、调控模型,系统的控制目标是整体的运行成本和联络线功率最低,进而得到微网内各个微电源的功率状况,但系统的控制时间尺度未涉及到;文献[5]采用热泵平抑微网内电功率的波动,尽可能减少电储能装备的充放电次数,但电储能平抑策略未详细描述。上述研究对电—热或冷—热—电联合微网进行了一系列研究和取得了相应的成果,但尚未实现电、热 2 种能源形式的耦合、协调控制,热力网的优势并未充分挖掘<sup>[2-6]</sup>。

本文以电—热联合微网为研究对象,电转热的设备是热泵,提出一种基于光伏功率波动特征的多类型储能协同控制方法。首先分析热泵供热、光伏电站和混和储能的电—热联合微网的特点。根据光伏功率波动的不同时间尺度,采用变时间常数滤波的方法,将电站出力分为低频和中高频两部分。

大时间尺度的出力波动,可由热泵进行平移,中小时间尺度的波动则由混合储能进行平抑。同时,混合储能模块采用功率自适应转移算法,可将超级电容的平抑功率逐步转移给蓄电池,避免电池频繁的充放电<sup>[7-9]</sup>。

## 1 电—热联合微网系统结构

电—热联合微网结构如图 1 所示,包含微电网和热力网,电网中含有分布式光伏、混合储能和负载,系统可与大电网并网运行,也可以独立运行。光伏单元通过变流器向电网传输电能,蓄电池和超级电容通过双向变流器与系统进行能量交互,热泵利用微电网中的电能,吸收环境热量,并输送到热力网供给终端用户。

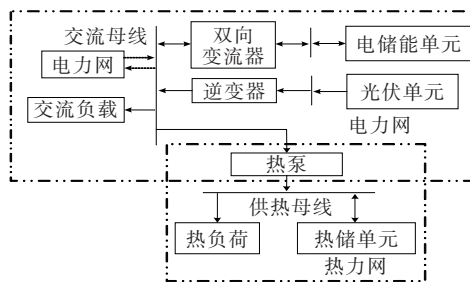


图 1 电—热联合微网结构

Figure 1 The structure of microgrid with combined heat and power system

电—热联合微网技术的重点是实现对电、热 2 种能源的协调供应和互补应用。蓄电池和超级电容组成的电储能设备,分别是能量型和功率型的储能介质,可同时满足能量密度和功率密度大的特点,对其进行双向的能量控制,保证微网内电能的供需平衡,同时稳定电网中的电压和频率。不同于电储能装备,热泵将能量存储在储热装置中或供给终端用户,可理解为一种安装在用户侧的虚拟储能装备,可将电能转换为其他形式的能源。联合微网考虑了热能“易存储,难传输”和电能“易传输,难存储”的互补特点<sup>[6-8]</sup>。针对光伏电站出力的波动和全额消纳,若仅通过混合储能进行功率的平抑,则整体投资成本会很高。热泵通过实时调节压缩机的运行功率,同样能改变微网内功率的流动。因此可综合两者的优势,采用 2 种形式的能量转换方式,实现光伏功率的消纳和波动平抑。相应的控制系统

同时对电、热能量进行管理和调度,充分利用两者控制的灵活性与互补特性,为满足用户的用电用热需求提供了全新的解决方案。融合热力网、蓄电池和超级电容的多类型混合储能系统中,充分利用各单元的特性,设计灵活的协调控制策略来提升平抑可再生能源波动的能力和实现全额消纳<sup>[6]</sup>,这就需要控制策略具备区分不同时间尺度的功率波动,以及根据不同时间尺度的波动,调整各储能单元的出力,进行自适应的平抑。

## 2 双层协同功率控制策略

电—热联合微网控制系统采集光伏电站功率信息、混合储能系统的实时荷电状态和热泵运行情况,在保证系统设备安全和电压频率稳定的前提下制定电转热的控制策略,使得能量在三者之间流动。在电—热联合系统中,热泵实时参与光伏电功率的平抑,同时需满足终端用户的供热需求,通过反应终端用户用热需求的状态参数进行相关的约束。

光伏出力波动的的时间尺度,是指功率在时间轴上变化的快慢。通常若信号的时间尺度越小,表明信号的波动越频繁;反之信号的时间尺度越大,说明信号的变化周期越大,对应时间曲线越平滑。在频域上,时间尺度小代表高频带,时间尺度大代表低频带<sup>[10-12]</sup>。

联合系统的协同控制方法如图2所示。主要包括电—热耦合控制层和快速时间尺度的底层自适应控制。耦合控制层包括前期预处理技术,主要利用电站的实时功率数据,采用变时间常数的低通滤波技术,确定热泵和混合储能分别补偿的功率。下层采用功率自适应转移算法,算法具体是将超级电容平抑的功率逐步变成由蓄电池承担,最终目的是使电池功率整体上趋于平滑,尽可能减少充放电次数。定义 $P_{Flu}(t)$ 为 $t$ 时刻光伏功率的波动,则 $P_{Flu}(t)$ 的表达式如下:

$$P_{Flu}(t) = P_{Sc}(t) + \Delta P_{HP}(t) + P_{BESS}(t) \quad (1)$$

$$\Delta P_{HP}(t) = P_{HP}(t) - P_{HP,N} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $P_{BESS}(t)$ 、 $P_{Sc}(t)$ 分别为蓄电池与超级电容的实时功率,充电为正,放电为负; $\Delta P_{HP}(t)$ 为热泵参与光伏功率平抑的部分,通过热泵输出实时功率 $P_{HP}(t)$ 减去供热输出功率 $P_{HP,N}$ 。

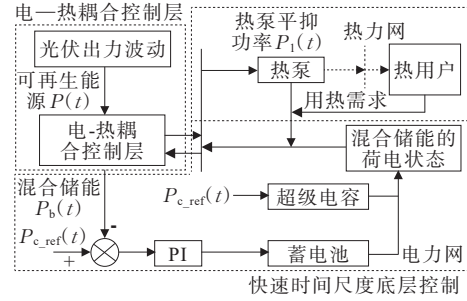


图2 电—热联合微网控制结构

Figure 2 The control system of microgrid with combined heat and power system

电—热耦合控制层中,选用的低通滤波器模型如下:

$$G(s) = \frac{1}{1 + T_f s} \quad (3)$$

式中, $T_f$ 为一阶低通滤波器的时间常数,滤波器的截止频率和 $T_f$ 有关。若 $T_f$ 发生变化,滤波器的输出也会跟着变化。因此通过调整 $T_f$ 来调节滤波器的输出,实现不同时间尺度变化的光伏功率分解,原理如图3所示。时间常数调整规则与系统需要平抑的功率有关,通常时间常数越大,对应热泵平抑的功率越平滑,混合储能的功率就越大;反之,时间常数越小,热泵和混合储能平抑的趋于一致。

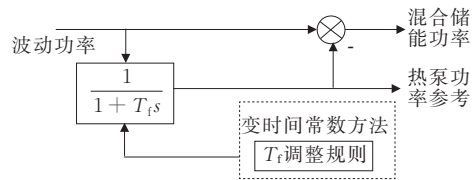


图3 基于波动特性的功率分解

Figure 3 The power decomposition based on wave characteristics

时间常数具体调整规则如下。

1) 当 $E_{HESS}(t) > E_{HESS1}$ ,  $P_{HP}(t) > 0$ , 则 $T_f(t + \Delta t) = T_f(t) + \Delta T$ ; 当 $E_{HESS}(t) > E_{HESS1}$ ,  $P_{HP}(t) < 0$ , 则 $T_f(t + \Delta t) = T_f(t) - \Delta T$ 。 $E_{HESS}(t)$ 表示 $t$ 时刻混合储能的总能量, $E_{HESS0}$ 、 $E_{HESS1}$ 表示混合储能的能量设定值, $T_f(t)$ 、 $T_f(t + \Delta t)$ 分别表示 $t$ 和 $t + \Delta t$ 时刻的时间常数, $\Delta T$ 表示时间常数的变化量。

2) 当 $E_{HESS}(t) < E_{HESS0}$ ,  $P_{HP}(t) > 0$ , 则 $T_f(t + \Delta t) = T_f(t) - \Delta T$ ; 当 $E_{HESS}(t) < E_{HESS0}$ ,  $P_{HP}(t) < 0$ , 则 $T_f(t + \Delta t) = T_f(t) + \Delta T$ 。

3) 当 $E_{HESS0} < E_{HESS}(t) < E_{HESS1}$ , 则 $T_f(t + \Delta t) = T_f(t) = T_f^*$ 。

热泵作为终端用户主要的热供应源,其容量不

仅需考虑用户的用热需求,还需具备平抑分布式光伏功率波动的容量裕度。实际运行时热泵调节压缩机功率输出,对应的响应速度相对较慢。因此在保证用户用热需求的前提下,可实现对分布式光伏功率波动的低频分量进行有效平抑。

混合储能中超级电容属于功率型储能元件,蓄电池属于能量型储能元件,两者最大的不同是响应速度;前者适用于平抑波动较快且对应能量较小的部分,后者可用于平抑变化相对较慢的分量。根据混合储能的平抑能力与范围,超级电容容量配置以电-热微网中光伏出力波动的高频分量为依据,蓄电池容量计算则根据光伏出力波动的中频分量。

### 3 混合储能系统自适应控制策略

混合储能系统的双级式变流器拓扑如图 4 所示。前级是 Buck/Boost 模块,允许能量双向流动,并且下桥臂导通、上桥臂关断时,电路处于 Boost 放电状态,上桥臂导通、下桥臂关断时,电路处于 Buck 充电状态。后级是 DC/AC 三相电压源型变流器。

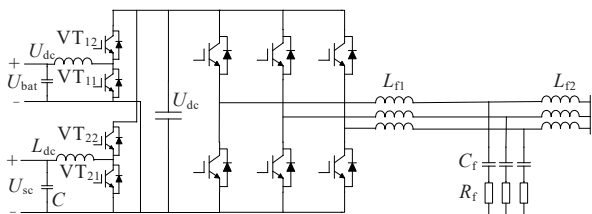


图 4 混合储能双级电路拓扑

Figure 4 Two-stage circuit topology of hybrid energy storage system

前级和后级变换器在直流侧彼此解耦,前后级间的功率波动会直接导致母线电压的变化,图 4 直流母线电压的动态方程为

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_0 - i_{dc} \quad (4)$$

式中,  $u_{dc}$ 、 $i_0$ 、 $i_{dc}$  分别为直流母线电压、直流侧输出电流及 DC/AC 侧输入电流。

忽略变流器损耗,直流侧输出功率为

$$p_{dc} = u_{bat} i_{bat} + u_{sc} i_{sc} = u_{dc} i_0 \quad (5)$$

式中,  $p_{dc}$ 、 $u_{bat}$ 、 $i_{bat}$ 、 $i_{sc}$  分别为直流侧功率、蓄电池端电压、蓄电池输出电流、超级电容电压和电流。

前文所述混合储能系统主要平抑光伏功率波动的中、高频部分,同时需要实现微网中交流电压、频率的控制。联合微网孤岛运行时,因面板遮挡造

成光伏功率发生快速变化,超级电容可迅速补偿系统功率的缺失部分,实现系统功率的供需平衡。但超级电容存储的能量有限,充放电的限值很容易满足,这时需借助蓄电池实现长时间的充放电。混合储能能量转移的自适应控制策略如图 5 所示。

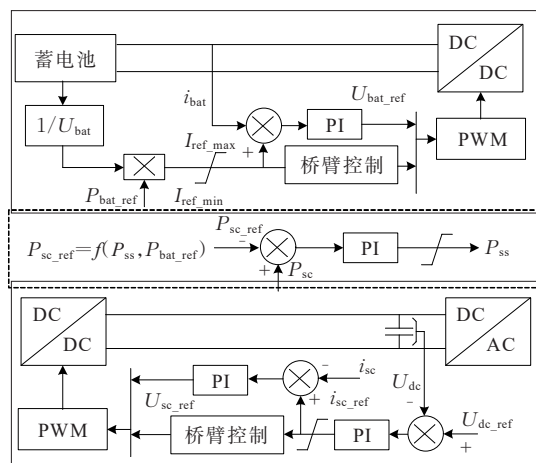


图 5 混合储能的自适应控制结构

Figure 5 Adaptive control structure of hybrid energy storage system

当直流母线电压稳定时,超级电容不与外界进行功率交互,此时平抑负荷功率  $P_{load}$  和光伏功率  $P_{pv}$  完全由蓄电池输出功率  $P_{bat}$  承担,定义如下:

$$P_{bat} = P_{load} - P_{pv} \quad (6)$$

图 5 中,超级电容采集得到的电压和电流分别与参考值作差并进行 PI 调节,得到调节后的输出量乘积即为超级电容功率  $P_{sc}$ ,也就是混合储能所应平抑的功率,通过 PWM 模块输出较为平稳的补偿功率  $P_{ss}$ 。若  $P_{ss}$  在蓄电池允许的充放电限值以内,控制系统则设置  $P_{ss}$  为该控制周期内蓄电池的参考功率;若  $P_{ss}$  在蓄电池最大可充可放功率以外,则设定蓄电池功率为最大可充/可放功率。定义放电时,储能系统功率为正,充电时,功率为负<sup>[13-15]</sup>。

系统工作时,混合储能所需平抑的总功率  $P_{ss}$  与蓄电池充放电参考值  $P_{bat\_ref}$ ,决定了超级电容充放电功率的参考值  $P_{sc\_ref}$ ,即

$$P_{sc\_ref} = f(P_{ss}, P_{bat\_ref}) \quad (7)$$

若  $P_{bat\_ref\_min} \leq P_{ss} \leq P_{bat\_ref\_max}$  时,混合储能系统所需平抑的功率  $P_{ss}$  在蓄电池最大充放电功率以内,平抑功率基本位于中频部分,超级电容暂不需要参与功率调节,即  $P_{sc\_ref} = 0$ 。

若  $P_{ss} \leq P_{bat\_ref\_min} < 0$  或  $P_{ss} \geq P_{bat\_ref\_max} > 0$  时,混合储能系统所需平抑的功率  $p_{ss}$  在蓄电池最大充放



电功率以外,需要超级电容参与系统的调节,即  $P_{sc\_ref} = P_{ss} - P_{bat\_ref}$ 。若平抑功率超出了混合储能所能补偿的最大限值,为优先保证重要负荷的工作运行,就需要切除部分非重要负荷。

## 4 仿真验证

光伏电站某时间段输出功率经图3所示调节器输出结果如图6所示。为了突出调节效果,  $T_i$ 初值选为0.4 s,之后根据设定的规则调整  $T_i$ ,  $\Delta T$ 取0.05 s。对比图6结果可知,经变时间常数的滤波处理后可将光伏功率分解成不同时间尺度的量,然后对不同的储能或能量转换模块分别进行平抑。

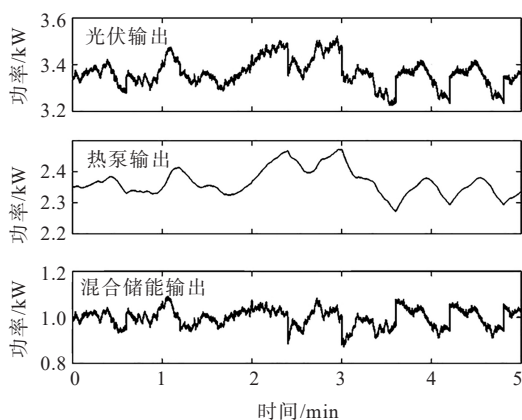


图6 电—热微网仿真波形

Figure 6 Simulation waveforms of microgrid with combined heat and power system

进一步为验证所提自适应控制策略的准确性,根据图1所示的电—热联合微网的结构,在Matlab/Simulink中搭建含有光伏发电单元、混合储能系统和储热系统在内的仿真环境。其中光伏发电系统输出功率范围为5~15 kW,蓄电池储能配置的额定功率为20 kW,容量为400 A·h,额定电压为500 V;超级电容的额定功率为20 kW,电容值为10 F,额定电压为400 V。

在光伏输出和供热正常时,光照强度、负载大小分别设置如表1所示,仿真输出波形如图7所示。通过仿真,电—热联合微网采用基于波动参数分解的双层协同控制策略时。在光照强度、负载变化的情况下,都可以保持稳定的电网电压和频率,给电、热负荷提供电能支持,保持微网孤岛运行时较好的电能质量。在此基础上,进一步对混合储能系统中的

表1 光照和负载设置

Table 1 Lighting and load settings

光照设置		负载设置	
时间/s	数值/(W/m <sup>2</sup> )	时间/s	数值/ $\Omega$
1.1~1.2	600	1.1~1.6	10
1.2~1.4	800	1.6~1.8	5
1.4~2.0	1000	1.8~2.0	10

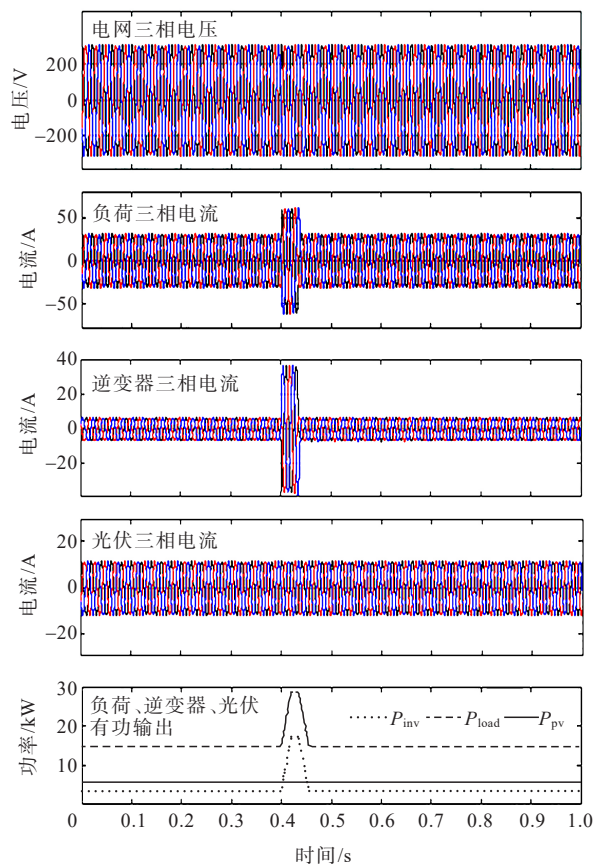


图7 混合储能常规控制时负荷突增

Figure 7 Normal control of hybrid energy storage system

常规控制与自适应控制进行比较,以验证该策略在减小蓄电池功率输出冲击方面的有效性。保持光伏功率输出固定,使系统三相对称负荷突然增加然后再恢复。在这个过程中,2种控制策略结果如图8、9所示。从蓄电池输出功率变化的结果对比可以发现,在负荷功率短时升高并迅速恢复到原值时,采用自适应控制策略的蓄电池输出功率变化幅度小,对蓄电池冲击小;而采用常规控制时蓄电池输出功率瞬时冲击大,有利于保证微电网孤岛系统的稳定性和系统运行的电能质量。此外,采用混合储能自适应控制时对应的系统频率变化波形如图10所示,可知负载突增将会造成系统频率减小,负载突减则会造成系统频率增大,但系统频率会受到调节作用,很快恢复到额定频率。

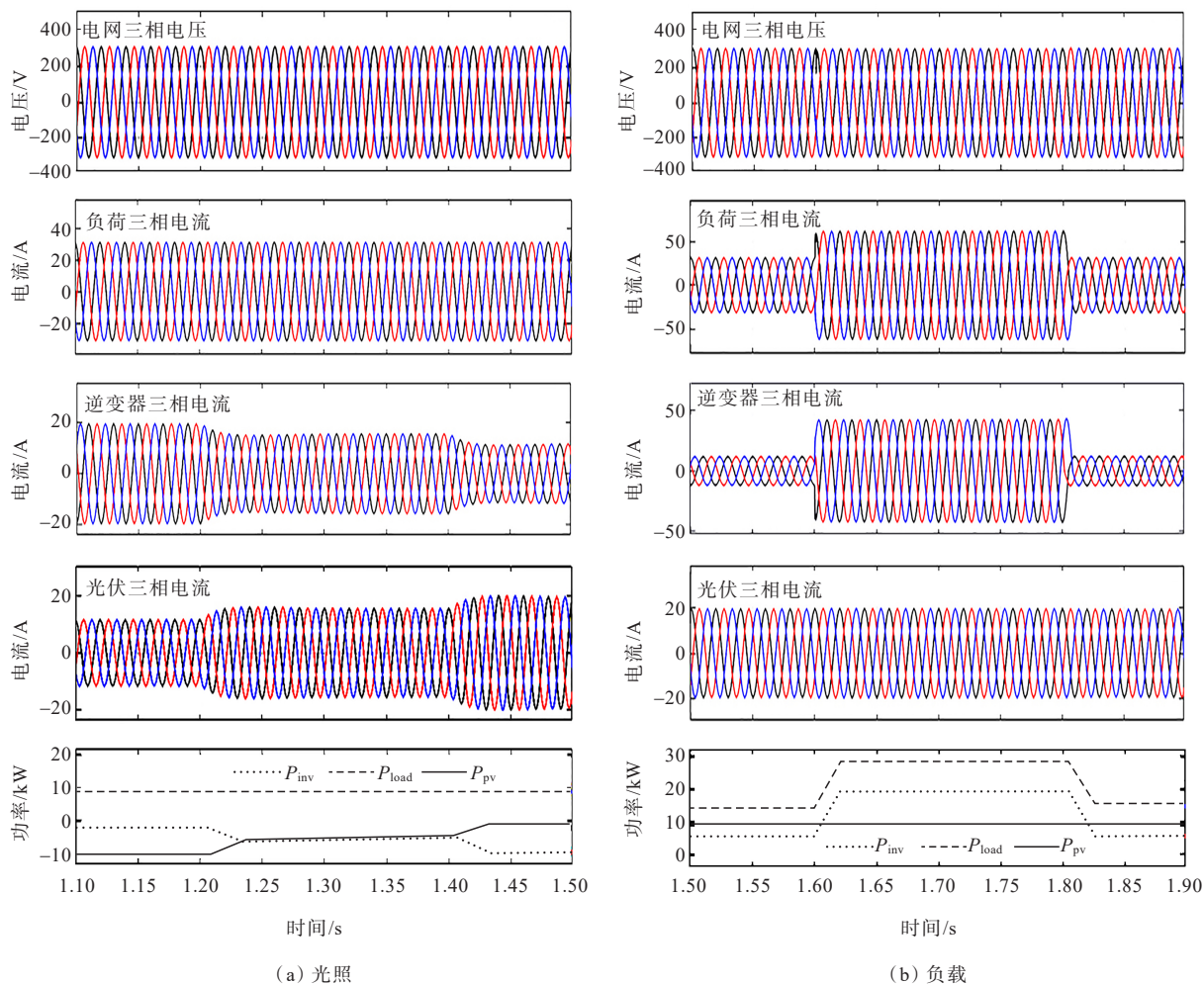


图 8 光照和负载变化时波形

Figure 8 Simulation waveforms under variable light and load circumstances

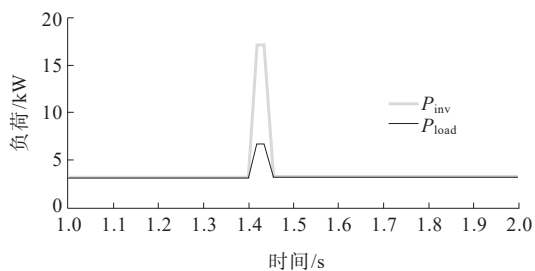


图 9 混合储能自适应控制时负荷突增

Figure 9 Adaptive control of hybrid energy storage system

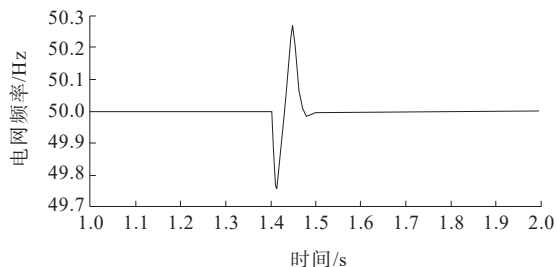


图 10 系统频率的变化波形

Figure 10 Waveform of system frequency

### 5 结语

本文针对蓄电池、超级电容和热泵等多类型储能和能源转换系统组成的微电网,提出一种面向电-热联合微网的多类型储能协同控制方法。

1) 电-热联合微网系统通过附加混合储能可以有效实现能量的协调控制,充分抑制可再生能源的功率波动;

2) 采用双层控制模型可以改善自适应波动平抑算法的执行效率,而利用热泵抑制光伏出力波动能够有效减少电储能的投资成本,提高电-热联合微网的供电可靠性,并延长混合储能的使用寿命;

3) 热泵和混合储能各自需要平抑的功率可通过调整双层控制模型的滤波器时间常数分别确定。

基于上述成果,未来将进一步对基于光伏、风能等可再生能源的电-热联合微网运行调度优化

及更多类型储能复合系统的协同控制开展讨论。

### 参考文献:

- [1] 梁帅奇,牟晓春,赵雪,等.含有储能单元的微电网运行控制技术[J].电力科学与技术学报,2011,26(4):74-79+87.  
LIANG Shuaiqi, MOU Xiaochun, ZHAO Xue, et al. Operation and control techniques of micro-grids with energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(4): 74-79+87.
- [2] 王姝,石晶,龚康,等.多元复合储能系统及其应用[J].电力科学与技术学报,2013,28(3):32-38+44.  
WANG Zhu, SHI Jing, GONG Kang, et al. Composite energy storage systems and its applications[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(3): 32-38+44.
- [3] 施金晓,黄文焘,樊飞龙,等.电—热联合微网中分布式可再生能源功率波动平移策略[J].中国电机工程学报,2018,38(2):1-6.  
SHI Jinxiao, HUANG Wentao, FAN Feilong, et al. A strategy to suppress fluctuation of distributed renewable energy in microgrids with combined heat and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 1-6.
- [4] 张国驹,唐西胜,周龙,等.基于互补PWM控制的 Buck/Boost双向变换器在超级电容器储能中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(6):15-21.  
ZHANG Guoju, TANG Xisheng, ZHOU Long, et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in super capacitor energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21.
- [5] HYUNJAE Y, SEUNG K S, YONGHO P. System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44 (1): 108-114.
- [6] 孙强,孙志凰,潘杭萍,等.考虑多种储能的数据中心综合能源系统配置优化[J].中国电力,2022,55(9):1-7.  
SUN Qiang, SUN Zhihuang, PAN Hangping, et al. Configuration optimization of integrated energy system for data center considering multiple energy storage facilities [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 1-7.
- [7] 王成山,刘梦璇,陆宁.采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法[J].中国电机工程学报,2012,32(25):36-43.  
WANG Chengshan, LIU Mengxuan, LU Ning. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 36-43.
- [8] 阮正鑫,张逸,张嫣,等.高比例光伏与配电网超高次谐波交互影响研究[J].电力工程技术,2021,40(2):18-25.  
RUAN Zhengxin, ZHANG Yi, ZHANG Yan, et al. Interaction of high proportion photovoltaic and supraharmonic in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 18-25.
- [9] 陈景文,周媛,李晓飞,等.光储直流微网混合储能控制策略研究[J].智慧电力,2022,50(1):14-20.  
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20.
- [10] 杨荣,邹晓松,袁旭峰,等.计及混合储能荷电状态的光伏直流微网功率分配策略[J].电网与清洁能源,2021,37(9):118-126.  
YANG Rong, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng, et al. The power distribution strategy of the photovoltaic DC microgrid considering the state of charge of hybrid energy storage[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 118-126.
- [11] 闫群民,刘语忱,董新洲,等.基于CEEMDAN-HT的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):43-53.  
YAN Qunmin, LIU Yuchen, DONG Xinzhou, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [12] 唐西胜,齐智平.基于超级电容器储能的独立光伏系统[J].太阳能学报,2006,27(11):1097-1102.  
TANG Xisheng, QI Zhiping. Study on a stand-alone PV system with ultracapacitor as energy storage device[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(11): 1097-1102.
- [13] 乔志杰,马临超.适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J].高压电器,2022,58(12):75-84.  
QIAO Zhijie, Ma Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 75-84.
- [14] 李斌,宝海龙,郭力.光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J].电力自动化设备,2014,34(3):8-15.  
LI Bin, BAO Hailong, GUO Li. Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 8-15.
- [15] 杨海晶,李朝晖,石光,等.微网孤岛运行下储能控制策略的分析与仿真[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(3):67-71.  
YANG Haijing, LI Chaohui, SHI Guang, et al. Analysis and simulation of energy storage system under micro-island operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(3): 67-71.