

计及群控电热泵的微网联络线功率平滑策略

施金晓¹, 黄文焘¹, 邵能灵¹, 郑晓冬¹, 陶伟龙², 赵彦龙³, 余墨多¹

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 国网合肥供电公司, 安徽 合肥 230000;
3. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 为有效平滑电-热联合型微网的联络线功率波动, 提出一种基于电热泵和蓄电池的协同控制策略。考虑电热联合微网的运行特征及能量交互方式, 基于电热泵的运行特性建立电-热能量转换模型。通过分析电热泵群优先度序列, 计算电热泵群可运行数量与状态切换序号指针。考虑机组启停的调控限制, 采用集群控制算法计算电热泵群开关序列。基于储能荷电状态以及电热泵实际出力状态, 分别建立蓄电池、电热泵功率分配权函数, 将联络线的波动功率在蓄电池与电热泵群间进行分配。算例结果表明, 该策略能够通过电-热能量协同控制实现微网联络线功率平滑, 同时提升电-热联合型微网的互补经济性与能量综合利用效率。

关键词: 功率波动抑制; 联络线; 电热泵; 储能系统; 电-热联合微网; 功率分配

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.027

0 引言

随着能源互联网的迅猛发展, 以冷、热、电、气等多种能源进行综合规划与多元互动, 形成的具有多能协同特征的综合能源系统是当前研究热点^[1-3]。然而, 热力网、电力网以及燃气网等能量供给系统目前普遍存在独立设计、规划且各自运行的特点, 各能源网之间缺乏交互与协调, 很难发挥多能源供应层面能量耦合互补与梯级利用的优势^[4]。

随着电热联系日益紧密, 微网用户对空调供暖、供热水的需求量不断提高, 电-热联合型微网的概念逐渐被提出^[5]。新型联合微网考虑电、热等多种能量形式的终端用户需求, 对基于传统能源和新能源开发建设的集成供能系统进行综合互补利用; 通过对电能与热能的耦合控制、智能调度与互补利用, 对电储能设备进行容量优化, 降低微网运行成本并显著提高能量综合利用效率^[6]。此外, 通过对电热转换元件的集中控制, 有效改善微网峰谷特性, 并在很大程度上抑制微网功率波动, 进而提升了分布式可再生能源的综合消纳能力。

针对微网联络线功率平滑技术, 现有研究主要集中于控制电储能设备的充放电出力, 以平抑功率波动分量^[7]。文献^[8]考虑储能全生命周期并建立目标函数, 基于超级电容、蓄电池容量优化模型实现混合储能的功率分配, 提升波动功率的抑制效果。蓄电池、超级电容等电储能设备虽具有良好的波动功率平抑性能, 但其高寿命损耗与投资成本在很大程度上限制了技术经济性^[9]。而面向电-热联合型微网, 通过电热转换技术对 2 种能量进行协同控制,

能够更加经济有效地平抑联络线功率波动^[10-12]。文献^[13]将电热泵作为需求侧响应负荷, 引入虚拟储能状态标识优先列表, 基于可变时间常数的巴特沃兹滤波器对联络线功率波动进行控制, 但未对电热泵可运行数量与状态切换时长进行限制, 可能导致电热泵的不合理启停。文献^[14]在电力市场背景下, 以减小微网联络线波动功率与总体运行成本为目标构建热电调控模型, 最终获取各微源的输出功率, 但对电、热耦合及能量转换关系的考虑不够深入。上述文献将电热转换元件作为电力网与热力网的能量交换接口, 在微网联络线波动功率控制的技术层面取得了一定突破, 但电热转换元件的运行方式较为单一, 尚未实现微网电、热 2 种能量的统一协调与深度耦合。为充分发挥电-热联合型微网的多能互补优势, 应综合考虑终端用户的电负荷与热负荷需求, 充分利用热力网的调节灵活性, 在考虑电热转换元件实际运行状态的基础上对微网联络线功率进行平滑控制。

针对以上问题, 本文面向电-热联合型微网联络线, 使用群控电热泵作为能量转换元件。通过采集的联络线实时功率与用户热需求量信息, 考虑蓄电池荷电状态以及电热泵群出力情况, 分析基于电热泵集群控制算法的开关序列模型, 设计蓄电池-电热泵出力权函数, 获取蓄电池、电热泵的功率出力, 最终实现微网联络线的功率平滑。

1 电-热联合型微网能量流

1.1 电-热联合型微网

电-热联合型微网的能量流向如图 1 所示, 按电、热能量形式的不同可将其划分为微电力网与微热力网, 使用电热泵群作为能量转换元件, 实现电

能与热能的交互。针对微电力网,风力发电机、光伏电池向电网注入电能,用户负荷从电网中消耗电能以满足自身用电需求,储能电池组通过实时充放电来实现电网的能量控制。对于微热力网,电热泵从微网获取电能后,通过驱动热泵压缩机与外界环境进行热交换,并将吸收的热量注入热网以满足用户热需求。能量控制中心经通信网获取电-热联合型微网中各类设备的实时出力信号,结合微网运行、控制与优化目标,对电热泵群、储能电池组等微网设备发出控制信号,优化设备出力以匹配微网中电能、热能需求,同时平抑微网联络线功率,最终实现电-热协同综合能量管理目标。

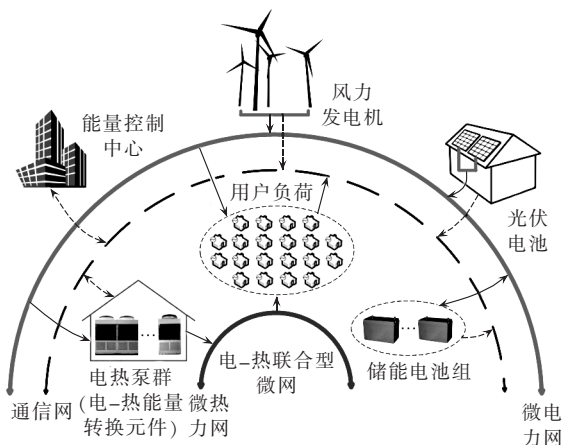


图 1 电-热联合型微网能量流向图

Fig.1 Energy flows of CPH microgrid

在电-热联合型微网中,定义 P_{Time} 为联络线实际功率,规定流入微网功率为正,反之则为负;用 P_{Wind} 表示风力发电出力, P_{PV} 表示光伏发电出力, P_{EL} 表示微网用户负荷的电需求功率, P_{HP} 表示电热泵群消耗功率,则微网 t 时刻的电功率平衡方程如式(1)所示。

$$P_{\text{Time}}(t) = P_{\text{EL}}(t) + P_{\text{HP}}(t) - P_{\text{Wind}}(t) - P_{\text{PV}}(t) \quad (1)$$

用 P_{TL} 表示微网内用户负荷的热需求功率,本文仅考虑基于热泵空调系统的用户供暖需求功率;定义 C_{HP} 为电热泵能效系数,等于电热泵产热功率与输入电功率之比。微网 t 时刻的热功率平衡方程如式(2)所示。

$$P_{\text{TL}}(t) = C_{\text{HP}} P_{\text{HP}}(t) \quad (2)$$

能量控制中心基于微网状态数据、可再生能源出力预测以及用户需求预测,制定微网能量管理与优化目标,进而确定微网联络线目标功率 P_{Time0} 。本文以平滑电-热联合型微网联络线功率波动为研究目标,能量控制中心通过通信网控制电热泵群启停状态并调节热泵压缩机实时运行功率,同时对储能系统进行充放电控制。定义联络线实际功率与目标功率之差为微网联络线功率波动成分,用 P_{ESS} 表

示储能系统用于平抑联络线波动的功率出力成分(充电为正,放电为负),用 ΔP_{HP} 表示电热泵用于平抑微网联络线功率波动成分,则微网联络线功率平滑目标可通过式(3)表示。

$$P_{\text{Time}}(t) - P_{\text{Time0}}(t) = P_{\text{ESS}}(t) + \Delta P_{\text{HP}}(t) \quad (3)$$

1.2 电-热能量转换模型

作为微网中电、热能量协同控制的核心,电热泵主要由热交换器、压缩机、节流阀以及温度采集装置构成,通过向电热泵输入少量电能,将低品位热能转化为高品位热能。

参考文献[15],假定每台电热泵只为一户居民进行空调供暖,且每台电热泵拥有相同的额定运行功率,则电热泵运行曲线可通过图 2 表示。图 2 中电热泵始终处于开启或关闭状态,电热泵开启状态期间用户室温上升,关闭状态期间用户室温下降, τ_{ON} 、 τ_{OFF} 分别为热泵处于开启、关闭状态的时间长度, T_{max} 、 T_{min} 分别为用户温度上、下限, T_{set} 为用户期望的目标温度,定义用户温度上、下限与目标温度差的绝对值为温度波动裕度 δ 。

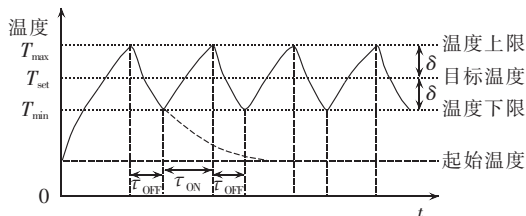


图 2 电热泵运行曲线

Fig.2 Operating curves of electric heat pump

由于第 i 个用户的室温 $T_{\text{HP},i}$ 由编号为 i 的电热泵独立供热,用 T_{outside} 表示室外环境温度; $x_{\text{HP},i}$ 表示第 i 台电热泵的开关状态,0 为关闭,1 为开启。在采样时间间隔 Δt 的条件下,用户实时室温如式(4)所示。

$$T_{\text{HP},i}(t+1) = \begin{cases} T_{\text{outside}}(t+1) - [T_{\text{outside}}(t+1) - T_{\text{HP},i}(t)]e^{-\frac{\Delta t}{RC}} & x_{\text{HP},i}(t) = 0 \\ QR - [T_{\text{outside}}(t+1) + QR - T_{\text{HP},i}(t)]e^{-\frac{\Delta t}{RC}} + T_{\text{outside}}(t+1) & x_{\text{HP},i}(t) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, C 为电热泵等值电容; R 为电热泵等值电阻; Q 为电热泵等值热比率[15]。

1.3 电-热联合型微网联络线功率平滑

考虑联络线的实时功率,在保证用户室温处于温度设定区间内的前提下,设计电热泵群控算法,为减少机组寿命损耗,对电热泵启停最小周期进行限制,最终确定基于电热泵群开关状态切换的序列模型,通过电热泵状态切换产生的功率变化量对联络线功率波动成分进行部分平抑。此外,对于图 2 与式(4)的电热泵模型,处于开启状态的电热泵均是以额定功率运行进行分析的。事实上,通过控制

热泵节流阀的工质流量与压缩机实时转速,热泵实时运行电功率随工质流量与压缩机转速相应改变,此时热泵实际功率与额定运行功率的功率偏差量可进一步平抑微网联络线的剩余波动分量^[16]。电热泵功率响应速度较慢,用于平抑联络线波动功率中的低频成分;蓄电池功率调节惯性低、速度快,能够对联络线高频波动分量进行平抑。因此,在确定电热泵群开关序列后,基于蓄电池荷电状态以及电热泵实际出力状态建立对应的功率分配权函数,最终将联络线剩余波动功率在蓄电池与电热泵群间进行分配。

面向电-热联合型微网的联络线功率波动整体控制流程如图 3 所示。通过采集分布式发电与用户负荷的实际出力,由电热泵群控算法对电热泵开关状态进行切换,以平抑联络线部分波动功率;通过采集电热泵、蓄电池的状态出力,由电热泵-储能协同控制方案确定对应的功率出力,将剩余波动分量在蓄电池与电热泵间分配。

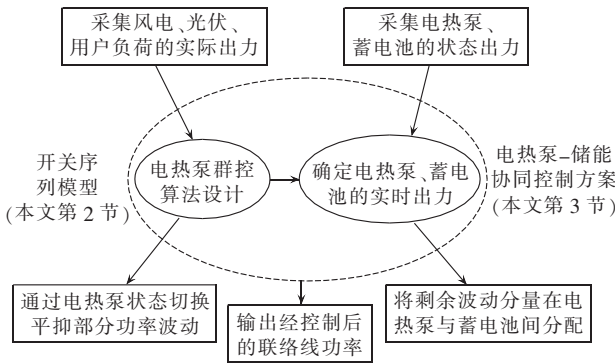


图 3 联络线功率波动整体控制流程

Fig.3 Overall control of tie-line power fluctuation

2 基于开关序列模型的电热泵集群控制算法

2.1 电热泵群状态切换的优先度分析

由式(2)可知,电热泵群的实时运行功率与微网负荷的热需求功率有关,在分析电热泵开关序列前需确定电热泵群的实时可运行数量。用 $N_{HP}(t)$ 表示 t 时刻电热泵群可运行数量, P_{HPN} 表示单台电热泵额定运行功率,根据图 2 与式(4),单台电热泵平均运行功率近似为 $P_{HPN}\tau_{ON}/(\tau_{ON}+\tau_{OFF})$,则 $N_{HP}(t)$ 可由式(5)表示,其中 $[\cdot]$ 表示取整函数。

$$N_{HP}(t) = \left\lfloor \frac{P_{TL}(t)(\tau_{ON} + \tau_{OFF})}{C_{HP}P_{HPN}\tau_{ON}} \right\rfloor \quad (5)$$

针对图 2 的电热泵运行曲线,当联络线实际功率为负值且用户室温接近温度上限时,优先对最接近温度上限的电热泵进行状态切换,使其从开启状态切换为关闭状态;当联络线实际功率为正值且用户室温接近温度下限时,优先对最接近温度下限的

电热泵进行状态切换,使其从关闭状态切换为开启状态。因此,为对电热泵状态切换进行优先度排序,定义 C_i 为第 i 台电热泵对应的用户舒适度,其表达式如式(6)所示,易知 $C_i(t) \in [-0.5, 0.5]$ 。

$$C_i(t) = \frac{T_{HP,i}(t) - T_{set}}{T_{max} - T_{min}} \quad (6)$$

为确定可用电热泵群的优先度序列,微网能量控制中心在 t 时刻获取联络线功率信号 $P_{Tline}(t)$,计算 t 时刻的电热泵群可运行数量,并对 $N_{HP}(t)$ 台电热泵按照用户舒适度进行排序:对于处于关闭状态的电热泵,以序号 $1, 2, \dots, N_{HP,1}(t)$ 按照 $C_i(t)$ 数值大小进行升序排列,电热泵由关闭状态切换为开启状态的优先度随序号依次降低;对于处于开启状态的电热泵,以序号 $1, 2, \dots, N_{HP,2}(t)$ 按照 $C_j(t)$ 数值大小进行降序排列,电热泵由开启状态切换为关闭状态的优先度随序号依次降低。相应条件满足:

$$x_{HP,i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_{HP,1}(t) \quad (7)$$

$$x_{HP,j} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, N_{HP,2}(t) \quad (8)$$

$$N_{HP}(t) = N_{HP,1}(t) + N_{HP,2}(t) \quad (9)$$

定义 k_1 为电热泵由关闭状态切换到开启状态的序号指针,定义 k_2 为电热泵由开启状态切换到关闭状态的序号指针,它们表示满足状态切换条件的电热泵末端序号,序号指针的确定原则如表 1 所示。

表 1 电热泵群优先度序列确定原则

Table 1 Principles of PGs priority sequence determination

联络线功率判定	电热泵切换操作	电热泵状态切换序号指针
$P_{Tline}(t) - P_{Tline0}(t) > 0$	开启电热泵: $x_{HP,i} = 1$ ($i = 1, 2, \dots, k_1$)	$k_1 = \min \{ (P_{Tline}(t) - P_{Tline0}(t)) / P_{HPN}, N_{HP,1}(t) \}$
$P_{Tline}(t) - P_{Tline0}(t) < 0$	关闭电热泵: $x_{HP,j} = 0$ ($j = 1, 2, \dots, k_2$)	$k_2 = \min \{ (P_{Tline0}(t) - P_{Tline}(t)) / P_{HPN}, N_{HP,2}(t) \}$

2.2 电热泵集群控制算法分析

电热泵群经优先度序列分析确定 t 时刻电热泵可运行数量及序号指针 k_1, k_2 后,仍需通过相关约束条件以确定最终的电热泵群开关序列。若微网联络线功率长期满足 $P_{Tline}(t) - P_{Tline0}(t) > 0$,则会导致部分电热泵对应用户的室温超过允许上限,需将达到用户室温允许上限对应的电热泵切换为关闭状态;若微网联络线功率长期满足 $P_{Tline}(t) - P_{Tline0}(t) < 0$,则会导致部分电热泵对应用户的室温低于允许下限,需将达到用户室温允许下限对应的电热泵切换为开启状态。

由于电热泵的启停操作会对设备造成一定的寿命损耗,频繁的状态切换甚至会影响电热泵压缩机的正常工作。事实上,对于电-热联合型微网,若用户热需求量处于峰时段,电热泵运行基数大,电热泵状态切换频率相对较低;然而若用户热需求量处于谷时段,此时电热泵运行基数很小,若联络线

功率波动较大,则很难保证电热泵状态切换频率处于合理范围。因此,定义 τ_{INT} 为电热泵状态切换时长下限,定义 $\tau_{\text{HP},i}$ 为第 i 台电热泵的状态切换时间长度,当第 i 台电热泵经优先度序列分析满足状态切换条件时,若 $\tau_{\text{HP},i} < \tau_{\text{INT}}$,则使该电热泵保持原有运行状态,以避免因频繁切换而产生不必要的寿命损耗,降低设备经济性。

在电-热联合型微网每个采样点时刻均对电热泵开关序列模型进行分析,以确定当前时刻电热泵的开关序列。综上分析, t 时刻平滑微网联络线功率的控制流程如图 4 所示。

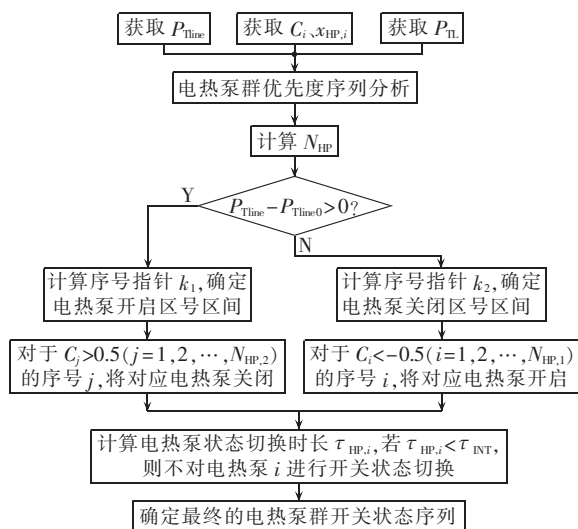


图 4 t 时刻平滑微网联络线功率的控制流程图

Fig.4 Flowchart of tie-line power smoothing at time t

3 平滑联络线波动功率的电热泵-储能协同控制方案

通过确定电热泵群开关序列,对满足用户室温约束条件的部分电热泵进行开关状态切换。若电热泵在开启状态下始终以额定功率运行,虽然一定程度上对微网联络线功率进行了平滑,但考虑到电热泵可运行数量随微网用户的热需求功率实时改变,在用户热需求量较高的时间段,电热泵可运行数量较高,联络线功率平滑效果较好;在热需求量较低时段,电热泵可运行数量相对很低,同时较快的状态切换速度会缩减电热泵的运行寿命,仅通过群控开关序列算法实时控制电热泵开关状态切换不能保证微网联络线全时段的功率平滑效果。因此,在群控开关序列的基础上,基于联络线实时功率,对处于开启状态下的电热泵调节其压缩机转速与工质流速,通过电热泵实际运行功率与额定出力间的偏差量来进一步平抑微网联络线功率波动,同时配合储能系统充放电,最终实现微网联络线的功率平滑效果。

经群控开关序列模型后的联络线剩余波动分量用 P_{HESS} 表示, P_{HESS} 由蓄电池和电热泵出力偏移分量共同承担。蓄电池作为一种电储能设备,其功率信号响应速度很高;电热泵在保证微网用户负荷需求的同时,具备平抑微网联络线功率波动的能力。通过调节压缩机出力,电热泵功率调节的响应速度相对较慢。因此,通过一阶低通滤波将联络线功率波动划分成高频波动分量与低频波动分量,针对蓄电池与电热泵的调节惯性差异,由电热泵平抑功率波动中的低频成分,蓄电池则承担高频波动分量以及经电热泵平抑后的剩余低频成分。用 λ_0 表示一阶滤波时间常数,根据文献[16]对电热泵与蓄电池功率响应的试验测试结果,可进一步确定滤波时间常数的具体数值。用 P_{HF} 表示经一阶滤波后获得的高频分量,由蓄电池承担; P_{LF} 表示经一阶滤波后获得的低频分量,由电热泵、蓄电池共同承担。 P_{HF} 与 P_{LF} 的表达式分别如式(10)、(11)所示。

$$P_{\text{HF}}(s) = \frac{s\lambda_0}{1+s\lambda_0} P_{\text{HESS}}(s) \quad (10)$$

$$P_{\text{LF}}(s) = P_{\text{HESS}}(s) - P_{\text{HF}}(s) = \frac{1}{1+s\lambda_0} P_{\text{HESS}}(s) \quad (11)$$

针对联络线低频波动分量 P_{LF} ,通过构建蓄电池、电热泵的出力权重函数对 P_{LF} 进行功率分配。电热泵按照用户热需求功率进行容量配置后,在用户室温及热泵容量的约束下,功率波动低频分量存在无法完全由电热泵平抑的可能,此时由蓄电池按其能力对剩余波动分量进行平抑。当低频功率波动为正时,若电热泵接近功率调节上限,则相应提高蓄电池的充电功率,以减少电热泵平抑低频波动功率的比例;若蓄电池荷电状态接近允许上限,则上调电热泵出力功率,以减少蓄电池参与平抑低频波动功率的比例。低频波动功率为负的情况类似。定义 $W_{\text{ESS}}(\cdot)$ 为蓄电池出力权重函数,当蓄电池荷电状态 SOC_{ESS} 接近容量上限时,通过构建 $W_{\text{ESS}}(\cdot)$ 使蓄电池优先放电并减少充电;当 SOC_{ESS} 接近容量下限时,构建 $W_{\text{ESS}}(\cdot)$ 使蓄电池优先充电并减少放电。SOC_{ESS} 与 $W_{\text{ESS}}(\cdot)$ 的表达式分别如式(12)和式(13)所示。

$$\text{SOC}_{\text{ESS}}(t) = \frac{\text{SOC}_{\text{ESS}}(t-1)E_{\text{ESS}} + P_{\text{ESS}}(t-1)\Delta t}{E_{\text{ESS}}} \quad (12)$$

$$W_{\text{ESS}}(t) = a_1 P_{\text{HESS}}(t) \text{SOC}_{\text{ESS}}(t) + a_2 P_{\text{HESS}}(t) + a_3 \text{SOC}_{\text{ESS}}(t) + a_4 \quad (13)$$

其中, E_{ESS} 为蓄电池容量; a_1 — a_4 为权重函数常系数。

定义 $W_{\text{HP}}(\cdot)$ 为电热泵出力权重函数,当电热泵出力偏移状态 S_{HP} 接近允许上限时,构建 $W_{\text{HP}}(\cdot)$ 使 ΔP_{HP} 负方向增大;当 S_{HP} 接近允许下限时,构建 $W_{\text{HP}}(\cdot)$ 使 ΔP_{HP} 正方向增大。 ΔP_{HP} 、 S_{HP} 的表达式分别如式(14)和式(15)表示, $W_{\text{HP}}(\cdot)$ 的表达式如式(16)所示,其中 a_5 — a_7 为权重函数常系数。权重函数 $W_{\text{ESS}}(\cdot)$ 与 $W_{\text{HP}}(\cdot)$

的三维坐标图分别如图 5 与图 6 所示。

$$\Delta P_{HP}(t) = P_{HP}(t) - N_{HP}(t)P_{HPN}[\tau_{ON}/(\tau_{ON} + \tau_{OFF})] \quad (14)$$

$$S_{HP}(t) = \frac{\Delta P_{HP}(t-1)}{N_{HP}(t)P_{HPN}} \quad (15)$$

$$W_{HP}(t) = a_5(P_{LF}(t) + a_6)(S_{HP}(t) + a_7) \quad (16)$$

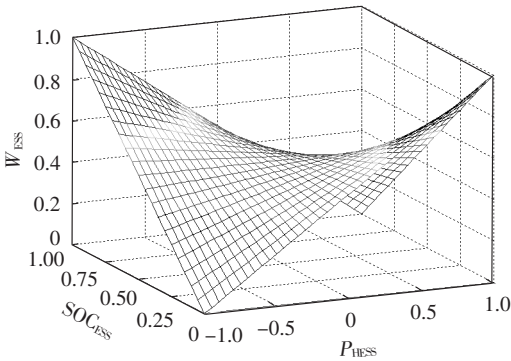


图 5 蓄电池出力权函数

Fig.5 Power allocation weight function of ESS

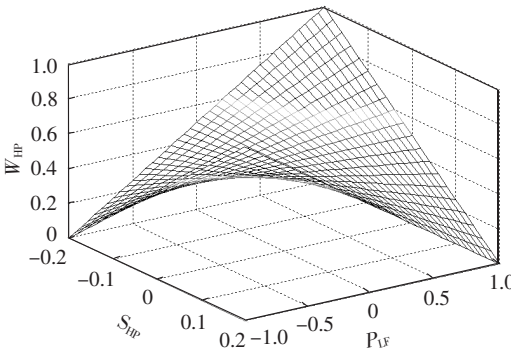


图 6 电热泵出力权函数

Fig.6 Power allocation weight function of HP

将微网联络线波动功率在蓄电池与电热泵间进行分配时,需考虑电热泵群实时运行数量,运行数量较大时电热泵可提高波动功率分配比例,运行数量较少时则减少分配比例。定义 N_{HP_max} 为对应于微网用户最大热需求状态下的电热泵最大运行数量, ξ_0 为蓄电池与电热泵的等效容量比,则 ΔP_{HP} 与 P_{ESS} 的最终出力表达式为:

$$\Delta P_{HP}(t) = \frac{(N_{HP}(t)/N_{HP_max})W_{HP}(t)}{(N_{HP}(t)/N_{HP_max})W_{HP}(t) + \xi_0 W_{ESS}(t)} P_{LF}(t) \quad (17)$$

$$P_{ESS}(t) = P_{HESS}(t) - \Delta P_{HP}(t) \quad (18)$$

综上,微网联络线功率波动平抑策略可划分为电热泵群开关序列模型的建立以及电热泵-蓄电池的功率协同分配。平滑微网联络线功率的整体结构流程如图 7 所示。

4 仿真分析

4.1 电-热联合型微网结构与参数

以上海闵行区现已建成的中意绿色能源实验中心的拓扑结构与微网运行数据为参考进行仿真分析,电-热联合型微网的仿真拓扑结构如图 8 所

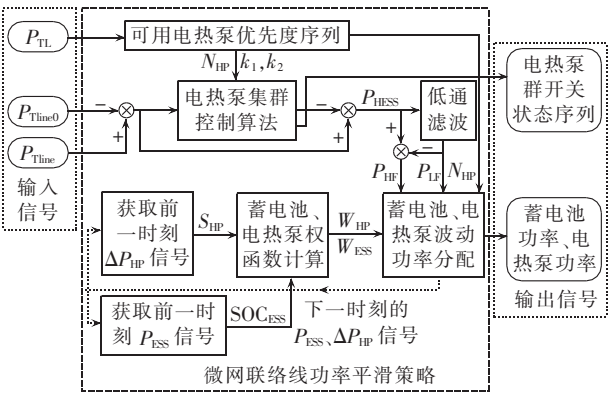


图 7 平滑微网联络线功率的结构流程图

Fig.7 Block diagram of microgrid tie-line power smoothing
示,微网运行相关参数如表 2 所示。

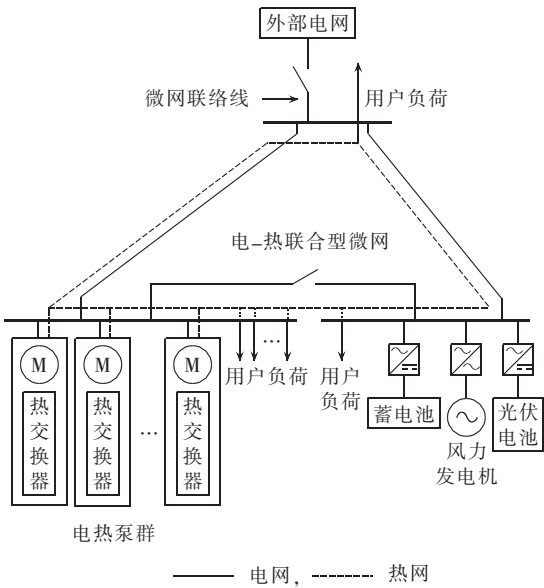


图 8 电-热联合型微网仿真拓扑结构

Fig.8 Topology of CPH microgrid for simulation

表 2 电-热联合型微网运行参数
Table 2 Operating parameters of CPH microgrid

参数	数值
电力设备参数	蓄电池容量 $E_{ESS}/(kW \cdot h)$
	50
	蓄电池功率极限/kW
热力设备参数	80
	蓄电池初始荷电状态/%
	60
其他参数	电热泵最大运行数量/台
	125
	电热泵能效系数 C_{HP}
其他参数	3.5
	用户温度上限 $T_{max}/^{\circ}C$
	22
其他参数	用户温度下限 $T_{min}/^{\circ}C$
	20
	温度波动裕度 $\delta/^{\circ}C$
其他参数	1
	单台电热泵额定出力/kW
	4.7
其他参数	滤波时间常数 λ_0/min
	120
	采样时间间隔 $\Delta t/min$
其他参数	1
	仿真时间/min
	1440

微网能量控制中心以平滑联络线功率波动为目标,电力设备参数影响蓄电池实时参与平抑联络线波动的能力;热力设备参数影响电热泵群的开关序列以及用户室温调节能力,进而影响电热泵参与

抑制功率波动的能力。考虑微网联络线的功率波动频率范围,基于热泵与蓄电池的运行特性与功率响应速度^[16],将一阶低通滤波时间常数设定为 120 min。

室外温度曲线如图 9 所示,室外温度会对用户室温曲线造成影响。

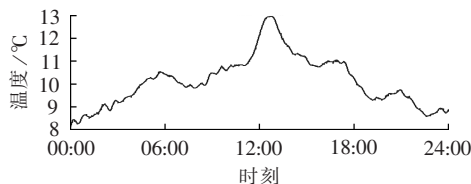


图 9 室外温度曲线

Fig.9 Curve of outdoor temperature

4.2 基于开关序列的电热泵群控策略算例分析

可再生能源发电的日出力曲线与微网负荷(电负荷和热负荷)日需求曲线如图 10 所示。功率信号的采样间隔为 1 min,微网联络线功率即为负荷功率与可再生能源发电功率之差。可再生能源功率为风电与光伏出力之和,负荷功率为电负荷与热负荷需求之和,可以看出微网联络线功率波动性明显,功率波动成分需由电热泵、蓄电池进行协同平抑。

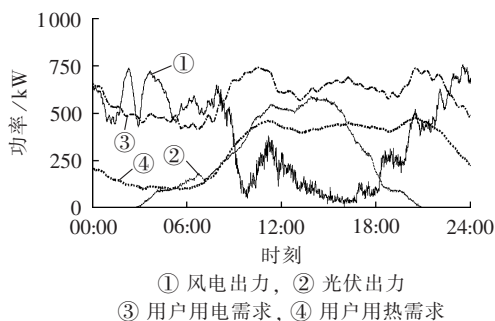


图 10 可再生能源与微网负荷日功率曲线

Fig.10 Daily power curves of renewable energy sources and microgrid loads

基于开关序列算法,对电热泵群控策略进行算例分析,各时段电热泵可运行数量与开启台数如图 11 所示。根据式(5),电热泵可运行数量主要与该时段的用户热需求功率相关,在 01:00—07:00 内其数量曲线与图 10 中对应时段的用户热需求曲线走向一致,但可运行数量不能超过微网电热泵最大运行台数限制。受微网联络线功率波动性的影响,电热

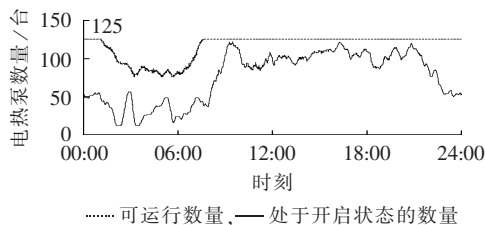


图 11 各时段电热泵可运行数量与开启台数

Fig.11 Available and operating HP quantities for different periods

泵实时开启数量具有较高的变化率,这也体现了对电热泵状态切换时长进行限制的必要性。

基于图 10 与图 11,将微网各时段电热泵的温度曲线进行汇总,对应的室温包络线如图 12 所示。可以看出,每条室温曲线均处于温度上、下限区间内,对于联络线功率 $P_{\text{line}}(t) - P_{\text{line0}}(t) > 0$ 的时段(如 08:00—10:00,联络线功率详见图 13),若两者功率差值较大,电热泵需提高功率向上调节能力,相应开启更多电热泵,因此在室温包络下边界处出现缺口,这表明此时有更多的热泵由关闭状态切换为开启状态;在联络线功率 $P_{\text{line}}(t) - P_{\text{line0}}(t) < 0$ 的时段(如 03:00—04:00,联络线功率详见图 13),电热泵需提高功率向下调节能力,相应关闭更多电热泵,因此在室温包络上边界处出现缺口,这表明此时有更多的热泵由开启状态切换为关闭状态。

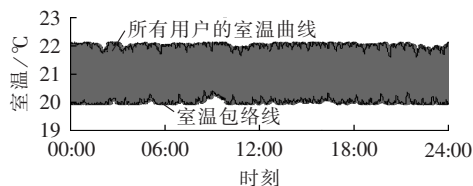


图 12 电热泵对应的室温包络线

Fig.12 HP-related envelope curves of room temperature

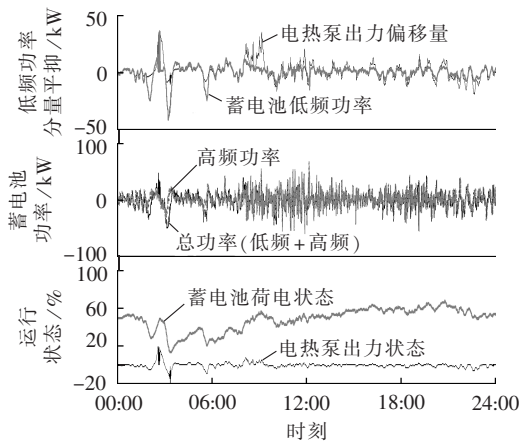
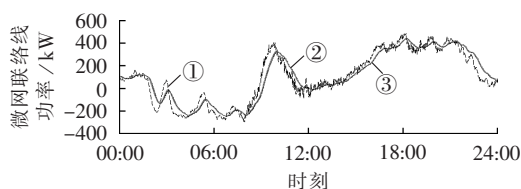


图 13 电热泵、蓄电池出力及状态曲线

Fig.13 Operating curves of HPs and ESS

4.3 基于电热泵-蓄电池的波动功率分配效果分析

电热泵不会始终运行于额定状态,能量控制中心通过获取联络线实时功率以及电热泵运行状态对其实际出力进行调节。电热泵-蓄电池出力及状态曲线如图 13 所示。电热泵通过额定出力偏移量以承担联络线波动的低频分量,蓄电池通过自身充放电承担高频波动分量以及经电热泵平抑后的剩余低频分量。结合图 11 与图 13 可知,在 02:00—04:00,电热泵开启数量较小,电热泵出力偏移状态变化率增大,以平抑联络线低频波动分量,同时增加蓄电池平抑低频波动的功率比例;在 16:00—



① 控制前, ② 控制目标, ③ 控制后

图14 微网联络线功率平滑效果

Fig.14 Effect of microgrid tie-line power smoothing

20:00, 电热泵开启数量较大, 出力偏移状态变化率降, 同时减少蓄电池参与平抑低频波动的功率比例。

微网联络线功率平滑结果如图13所示, 经电热泵集群控制算法以及电热泵-蓄电池功率分配后, 联络线功率波动幅度明显减少。该算例验证了计及集群控制算法的电热泵-蓄电池协同平抑联络线波动功率策略的正确性与有效性。

5 结论

本文基于电热泵集群控制技术并配合蓄电池充放电, 对电-热联合型微网的联络线功率进行平滑。微网能量控制中心通过获取可再生能源发电功率、联络线功率、用户热需求功率以及电热泵出力信号, 将电热泵作为需求侧负荷, 采用基于开关序列模型的集群控制算法, 得到电热泵群实时开关状态序列; 建立蓄电池-电热泵出力权函数, 对联络线波动功率进行协同分配, 最终获得蓄电池、电热泵的功率出力。实例仿真结果表明, 该策略以电热转换技术为手段, 对电、热能量进行协同管理与控制, 为匹配微网功率波动特性以及用户多能量需求提供了新的技术途径。

参考文献:

- [1] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [2] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [3] 程林, 刘琛, 朱守真, 等. 基于多能协同策略的能源互联微网研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 132-138.
CHENG Lin, LIU Chen, ZHU Shouzheng, et al. Study of micro energy internet based on multi-energy interconnected strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 132-138.
- [4] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [5] 王孟夏, 韩学山, 孙宏斌. 基于电热协调理论提升电网消纳间歇式能源发电能力的分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 7-12.
WANG Mengxia, HAN Xueshan, SUN Hongbin. Improving intermittent energy accommodation capability of power grid based on electro-thermal coordination theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 7-12.
- [6] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的多能互补孤立型微网运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 32-40.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. Operation control strategy for multi-energy complementary isolated microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 32-40.
- [7] 范立新, 郭浩, 顾文, 等. 基于储能与桨距角协调控制的风电功率波动平抑方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 100-105.
FAN Lixin, GUO Hao, GU Wen, et al. Wind power fluctuation suppression based on control coordination between energy storage and pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 100-105.
- [8] 肖峻, 张泽群, 张磐, 等. 用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 19-26.
XIAO Jun, ZHANG Zequn, ZHANG Pan, et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 19-26.
- [9] YANG Y, YANG N, LI H. Cost-benefit study of dispersed battery storage to increase penetration of photovoltaic systems on distribution feeders[C]//PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [10] 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.
- [11] WANG D, GE S, JIA H, et al. A demand response and battery storage coordination algorithm for providing microgrid tie-line smoothing services[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 476-486.
- [12] KAWACHI S, HAGIWARA H, BABA J, et al. Thermal comfort analysis during power fluctuation compensation by use of air-conditioning system[C]//IEEE PES International Conference & Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Washington DC, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [13] 王冉, 王丹, 贾宏杰, 等. 一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5124-5134.
WANG Ran, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A coordination control strategy of battery and virtual energy storage to smooth the micro-grid tie-line power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5124-5134.
- [14] XU L Z, YANG G Y, DONG Z, et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 53-60.
- [15] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [16] KAWACHI H, BABA J. Study on compensation of short term power fluctuation by use of heat pump air conditioning system

based on real machine[J]. IEEE Transactions on Power & Energy, 2012, 132(1): 77-85.

作者简介:

施金晓(1993—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为微电网能量管理、多能协同互补系统消纳技术(E-mail: 18817519355@163.com);



施金晓

黄文焄(1989—),男,安徽桐城人,讲师,博士,主要研究方向为微网、电力系统继电保护(E-mail: hwt8989@sjtu.edu.cn);

邵能灵(1972—),男,江苏溧水人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统保护与控制、变电站综合自动化、智能电网等。

Microgrid tie-line power smoothing strategy considering group control of electric heat pumps

SHI Jinxiao¹, HUANG Wentao¹, TAI Nengling¹, ZHENG Xiaodong¹, TAO Weilong²,
ZHAO Yanlong³, YU Moduo¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Hefei Municipal Electric Power Company, Hefei 230000, China;

3. State Grid Zibo Municipal Electric Power Company, Zibo 255000, China)

Abstract: A coordinated control strategy based on the electric HP(Heat Pump) and battery is put forward to smooth the tie-line power fluctuation of CPH(Combined Power-Heat) microgrid. With the consideration of its operating characteristics and energy conversion mode, an electric-thermal energy conversion model based on the operating characteristics of HP is established. The priority sequence of HP groups is analyzed, the quantity of available HP groups and the pointer of state switching number being calculated. A centralized control algorithm considering the constraints of unit start-stop control is adopted to calculate the switching sequence of HP groups. Based on the SOC of ESS(Energy Storage System) and the actual output power of HP, the power allocation weight functions of ESS and HPs are built respectively and the fluctuating power of tie-line is allocated between ESS and HP groups. Results of case study show that, the proposed strategy smoothes the microgrid tie-line power through the coordinated electric-thermal energy control while improves the complementary economy and the comprehensive energy utilization efficiency of CPH microgrid.

Key words: power fluctuation suppression; tie-line; electric heat pump; energy storage system; combined power-heat microgrid; power allocation