

计及需求侧管理的热泵 – 储能型微电网能量优化策略

施金晓¹, 邵能灵¹, 李珂¹, 唐跃中²

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司市南供电公司, 上海 201100)

摘要: 为减少储能总容量和蓄电池动作次数, 提出一种计及需求侧管理的微电网能量优化策略。考虑热泵的负荷特性, 根据产热量与热泵工质流速的关系建立相应的热泵系统模型。根据热负荷日需求曲线, 对热泵的储热容量模型进行分析与计算; 按照频率区间将微电网功率波动划分为高频成分与中低频成分, 并采用模糊控制理论将波动功率在热泵、蓄电池与超级电容间进行分配。该策略对微电网进行削峰填谷, 对功率波动进行抑制, 实现了微电网的可靠、经济运行。算例验证了所提能量管理策略的正确性与有效性。

关键词: 微电网; 能量优化; 能量管理; 需求侧管理; 热泵; 混合储能; 模糊控制; 优化

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.020

0 引言

微电网能有效解决分布式电源的大规模分散接入问题, 对新能源进行有效利用, 同时需满足网内用户对电能与热能的需求^[1-2]。风力发电具有随机性、波动性的特点, 为保证微电网的实时功率平衡, 同时为实现需求侧管理以及微电网的经济运行, 需要对微电网能量优化管理进行深入研究^[3-4]。

针对储能单元的运行控制与优化配置策略, 文献[5]根据不同的储能荷电区间设计相应的能量管理策略, 建立了负荷分配与可中断模型, 减小了储能的系统容量; 文献[6]通过模糊控制理论, 使用蓄电池-超级电容混合系统对功率波动进行平抑, 延长了蓄电池的使用寿命。上述研究通过对储能进行充放电管理, 减少了储能容量, 保证了微电网的可靠经济运行。然而, 储能的高投资成本仍在一定程度上限制着其在微电网中的应用^[7-8]。文献[9]比较并计算了储能系统的成本与运行经济性; 文献[10]设计了蓄电池寿命成本函数, 并对储能容量进行了优化。

作为减少储能容量的有效途径, 需求侧管理成为研究热点。文献[11]根据分时电价建立了分布式电源与需求侧负荷管理的协调运行模型; 文献[12]分别在日前与日内对微电网能量进行协调控制, 优化各发电单元和需求侧管理负荷的启停状态及有功出力。然而, 上述研究对需求侧管理负荷的分类较笼统, 并未对具体负荷的工作运行特性进行深入分析。目前, 国内外关于热泵作为需求侧负荷投入微电网的研究逐渐深入。文献[13]通过实验对热泵的工作特性进行了测量与分析, 并提出了一种能有效减少储能容量的功率波动平抑策略。热泵应用范围广, 对功率控制信号响应较快, 能配合储能实现微电网的实时功

率平衡^[14-15]。

为减少储能容量, 本文将热泵作为需求侧负荷应用于微电网, 提出了一种基于热泵、蓄电池与超级电容的能量管理策略。热泵与混合储能相互配合, 对负荷进行削峰填谷, 同时对功率波动进行抑制。实际算例表明本文方法能够实现微电网的实时功率平衡。

1 微电网能量管理策略

1.1 热泵系统模型

热泵是以环境介质为热源, 通过输入少量电能以实现低品位热能向高品位热能转移的装置, 用于供暖以及生产热水, 并以独有的优势在建筑能源应用中占据广泛的市场份额。热泵的系统结构模型如图 1 所示, 它主要由以下部分构成^[13]。

a. 压缩机: 将热泵工质由低温低压状态压缩至高温高压状态, 同时使工质在各部件中循环, 压缩机转速可调节, 热泵运行功率随之改变。系统功耗主要由压缩机承担。

b. 热交换器: 热泵工质在环境侧的热交换器中蒸发吸热, 并在水箱侧的热交换器中液化放热。

c. 节流阀与控制器: 节流阀调节热泵工质流速, 在控制器的作用下使工质流速与系统制热量匹配。

d. 储热装置: 用于存储热泵产生的热量, 并对微电网热负荷进行削峰填谷。

在负荷谷时段, 热泵的产热直接为负荷供热, 同

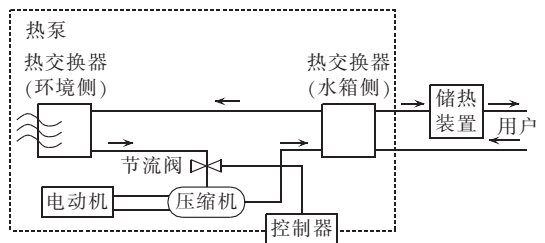


图 1 热泵系统结构

Fig.1 Structure of heat pump system

收稿日期: 2016-06-15; 修回日期: 2017-02-17

基金项目: 教育部科学技术研究项目 (113023A)

Project supported by the Science and Technology Research Project of Chinese Ministry of Education (113023A)

时将余热存储于储热装置;在负荷峰时段,通过热泵产热以及储热装置在谷时段的储热,共同为负荷供热。热泵工质流速在 $V_1 \sim V_2$ 之间调节,压缩机运行功率随流速相应改变。

将 Q_{pump} 定义为热泵单位时间产热量,定义 C 为热泵工质比热,用 v 表示热泵工质流量, ρ 表示热泵工质密度, ΔT 表示经过一个循环周期后热泵工质的温度差。经推导, Q_{pump} 可由式(1)表示。

$$Q_{\text{pump}} = C\rho v \Delta T \quad (1)$$

与产热量对应的热泵系统耗电量通过效能系数 F_{COP} 进行定义,用 E_{pump} 表示热泵单位时间的系统耗电量。则效能系数的表达式如式(2)所示。

$$F_{\text{COP}} = Q_{\text{pump}} / E_{\text{pump}} \quad (2)$$

蓄电池通过充放电对微电网的峰谷特性进行调节,但是投资成本相对较高,对微电网波动功率的抑制还会缩减蓄电池的运行寿命。具有储热装置的热泵系统能够调节热负荷的峰谷特性,并能改善微电网的功率波动特性,拥有更好的经济效益。以下对热泵与储能的容量优化作深入分析。

1.2 能量管理策略分析

为减小微电网对外部电网的影响,设定仅当外部电网处于负荷谷时段时,微电网能够从外部电网计划性地购入电能以填补微电网的能量需求缺额。其余时间段微电网与外部电网不进行功率交换。

能量管理系统分为削峰填谷阶段和功率波动抑制阶段。微电网削峰填谷阶段通过日前风力发电短期预测以及负荷短期预测,计算微电网从外部电网的计划购电量,并使用蓄电池与热泵储热装置对负荷进行削峰填谷。在功率波动抑制阶段,通过风电超短期预测和负荷超短期预测,控制注入热泵压缩机的工质流速以改变热泵的运行功率,同时配合蓄电池、超级电容充放电,共同对瞬时波动功率进行抑制。

在负荷谷时段的起始时刻,蓄电池储能容量与热泵系统储热量均处于一天中的最低值。蓄电池充电,注入热泵压缩机的工质流速预设为额定值,热泵除为负荷供热外,将大量产热存储在储热装置中。若微电网出现功率波动,则由热泵压缩机、蓄电池与超级电容共同抑制。

a. 如果风速瞬时降低或者电力负荷需求瞬时增加,通过控制器降低注入压缩机的工质流速,并将流速控制在 $V_1 \sim V_2$ 之间。热泵产热速度降低并且压缩机运行在欠载状态,部分功率波动被补偿,剩下的波动功率则由混合储能抑制。

b. 如果风速瞬时增加或者电力负荷需求瞬时下降,通过控制器增加流入压缩机的工质流速,并将流速控制在 $V_1 \sim V_2$ 之间。热泵产热速度增加并且压缩机运行在过载状态,部分功率波动被补偿,剩下的波动功率则由混合储能抑制。

在负荷峰时段的起始时刻,蓄电池储能容量与热泵系统储热量均处于一天中的最高值。蓄电池放电,注入热泵压缩机的工质流速预设为额定值。若微电网出现功率波动,则通过调节热泵压缩机的工质流速补偿部分波动功率,剩下的波动功率则由蓄电池与超级电容共同平抑。

2 微电网能量管理建模

根据微电网能量管理策略,蓄电池充放电功率绝对值的减小延长了其使用寿命。由于热泵的储热容量成本直接影响着微电网的经济运行,需建立其数学模型,以实现热泵-混合储能的功率优化分配。

2.1 储热容量模型

在对热泵-混合储能进行功率优化分配前,首先设定储热容量。通过分析热负荷日需求曲线,对储热容量进行求解。

为减小热泵的储热容量,在负荷谷时段,压缩机以额定功率运行,热泵为负荷供热,同时增加储热量;在负荷峰时段,压缩机仍运行于额定功率状态并对负荷供热,储热装置放热。热泵日功率曲线如图2所示,其中虚线为热负荷日需求曲线。

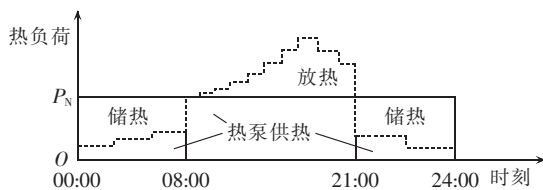


图2 热泵日功率曲线

Fig.2 Daily power curve of heat pump

由于与外界存在热交换,需考虑储热装置的热量损失,用 β 表示日储热量损失系数,则负荷谷时段储热量对应的用电量 E_v 以及负荷峰时段储热装置放热量 E_p 对应的电量之间的关系如式(3)所示。

$$E_p = (1 - \beta)E_v \quad (3)$$

将一天划分为 k 个时段,用 E_l 表示热负荷日用电量, $P_{l,k}$ 表示第 k 时段热负荷用电功率, τ_k 表示第 k 时段的时间长度, P_N 表示热泵额定运行功率,可得:

$$\begin{cases} E_l = \sum_k P_{l,k} \tau_k \\ E_l = \sum_k P_N \tau_k - \beta E_v \end{cases} \quad (4)$$

在负荷谷时段,热泵为负荷供热,同时将剩余热量存储在储热装置中。设 τ_m 表示负荷谷时段第 m 时段的时间长度, E_v 和 P_N 的关系如下式所示:

$$E_v = \sum_m (P_N \tau_m - P_{l,m} \tau_m) \quad (5)$$

通过计算可以得出 P_N 的表达式:

$$P_N = \frac{E_l - \beta \sum_m P_{l,m} \tau_m}{\sum_k \tau_k - \beta \sum_m \tau_m} \quad (6)$$

实际条件下,储热容量可由式(7)计算得出。

$$Q_{\text{actual}} = KF_{\text{COP}} \sum_m \left(\frac{E_1 - \beta \sum_m P_{1,m} \tau_m}{\sum_k \tau_k - \beta \sum_m \tau_m} \tau_m - P_{1,m} \tau_m \right) \quad (7)$$

其中, Q_{actual} 为实际储热容量; K 为热泵的边系数。确定 K 时, 需考虑热负荷功率波动及风电功率波动。

2.2 热泵-混合储能功率优化分配模型

调节热泵运行功率, 将实际功率与额定功率的偏差量用于抑制微电网瞬时功率波动, 配合混合储能, 并将功率波动成分在热泵、蓄电池及超级电容间进行分配。超级电容响应速度快, 而热泵是惯性元件, 响应速度相对较慢。因此, 波动功率的高频成分主要由超级电容补偿, 中低频成分由蓄电池与热泵共同平抑。定义 P_{Flu} 为微电网波动功率, 等于风电波动功率减去负荷波动功率。使用高通滤波器滤除功率波动中的高频成分 P_{HF} , 剩余的波动功率成分为 P_{LF} 。定义 τ 为滤波时间常数, 功率波动的高频与中低频成分分别为:

$$P_{\text{HF}}(s) = \frac{s \tau}{1 + s \tau} P_{\text{Flu}}(s) \quad (8)$$

$$P_{\text{LF}}(s) = P_{\text{Flu}}(s) - P_{\text{HF}}(s) = \frac{1}{1 + s \tau} P_{\text{Flu}}(s) \quad (9)$$

使用模糊控制将功率波动成分在热泵与混合储能间分配, 需同时考虑微电网功率波动状态以及超级电容、蓄电池与热泵的实时运行状态。模糊控制的输入量如式 (10) — (13) 所示。

$$I_1(t) = \text{SOC}_{\text{SC}}(t) \quad (10)$$

$$I_2(t) = \text{SOC}_{\text{B}}(t) \quad (11)$$

$$I_3(t) = P_{\text{pump}}(t) / P_{\text{N}} \quad (12)$$

$$I_4(t) = P_{\text{Flu}}(t) - P_{\text{SC,ref}}(t) - \Delta P_{\text{pump}}(t-1) \quad (13)$$

其中, $\text{SOC}_{\text{SC}}(t)$ 与 $\text{SOC}_{\text{B}}(t)$ 分别为 t 时刻超级电容与蓄电池的荷电状态; $P_{\text{pump}}(t)$ 为 t 时刻热泵的运行功率, $P_{\text{pump}}(t) / P_{\text{N}}$ 表示 t 时刻热泵的负载系数; $P_{\text{SC,ref}}(t)$ 为 t 时刻超级电容的充放电功率; $\Delta P_{\text{pump}}(t)$ 为 t 时刻热泵用于抑制微电网波动的功率分量, $P_{\text{Flu}}(t) - P_{\text{SC,ref}}(t) - \Delta P_{\text{pump}}(t-1)$ 表示 t 时刻由超级电容平抑后的中低频波动成分相对于 $t-1$ 时刻热泵功率分量的变化幅度。

图 3 给出了关于热泵与混合储能的功率分配模型: 微电网波动功率 P_{Flu} 经高通滤波滤除功率波动中的高频成分 P_{HF} , 经模糊控制 1 得到超级电容的充放电功率 $P_{\text{SC,ref}}$; 微电网波动功率与超级电容充放电功率的差值经模糊控制 2 得到用于平抑功率波动的热泵分量 ΔP_{pump} , 热泵运行功率为 $P_{\text{N}} + \Delta P_{\text{pump}}$, 余下的波动功率由蓄电池 $P_{\text{B,ref}}$ 承担。

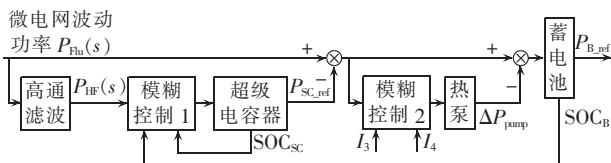


图 3 热泵-混合储能功率分配模型

Fig.3 Power allocation model of heat pump and hybrid energy storage

对于模糊控制 1, 当超级电容电量处于理想范围内时, 由其单独承担 $P_{\text{HF}}(t)$, 以减轻蓄电池的压力; 此外, 使超级电容的容量状态尽可能回到初始条件, 进而改善下一时间点的功率波动平抑能力; 当超级电容电量接近容量极限时, 蓄电池需要提升自身的平抑微电网波动功率比例, 增加蓄电池输出功率大小。

对于模糊控制 2, 当压缩机重载时, 若微电网功率波动变化率为正, 则减小模糊控制修正系数 $\mu_2(t)$, 避免热泵系统严重重载; 若微电网功率波动变化率为负, 则增大模糊控制修正系数 $\mu_2(t)$, 增加热泵平抑波动功率的比例。压缩机轻载的情况类似。

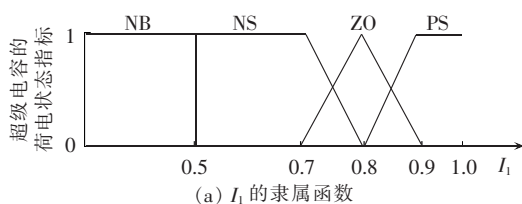
模糊控制 1 的输入隶属函数如图 4 和图 5 所示; 模糊控制 2 的输入隶属函数如图 6 所示。

根据模糊控制理论, 调节超级电容与热泵运行功率, 配合蓄电池充放电, 共同对功率波动进行抑制。

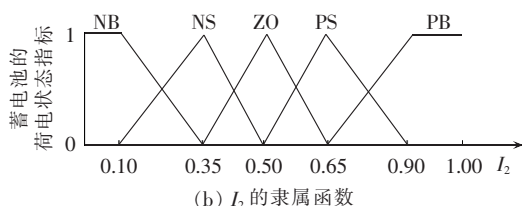
$$P_{\text{Flu}}(t) = P_{\text{SC,ref}}(t) + \Delta P_{\text{pump}}(t) + P_{\text{B,ref}}(t) \quad (14)$$

根据能量管理策略, 优先使用超级电容平抑高频功率波动, 再使用热泵、蓄电池平抑低频功率波动, 用 $\mu_1(t)$ 表示模糊控制 1 的修正系数, 热泵-混合储能功率分配如式 (15) — (17) 所示。

$$P_{\text{SC,ref}}(t) = P_{\text{HF}}(t) + \mu_1(t) |P_{\text{HF}}(t)| \quad (15)$$



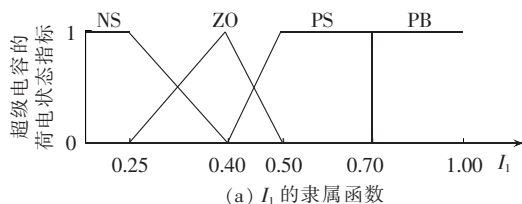
(a) I_1 的隶属函数



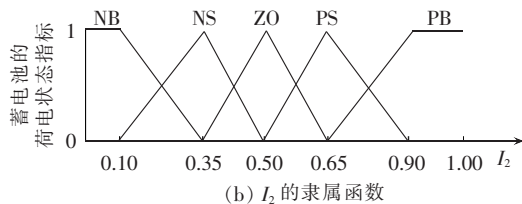
(b) I_2 的隶属函数

图 4 模糊控制 1 的输入隶属函数 ($P_{\text{HF}}(t) \geq 0$)

Fig.4 Input membership functions of fuzzy-control-1 ($P_{\text{HF}}(t) \geq 0$)



(a) I_1 的隶属函数



(b) I_2 的隶属函数

图 5 模糊控制 1 的输入隶属函数 ($P_{\text{HF}}(t) < 0$)

Fig.5 Input membership functions of fuzzy-control-1 ($P_{\text{HF}}(t) < 0$)

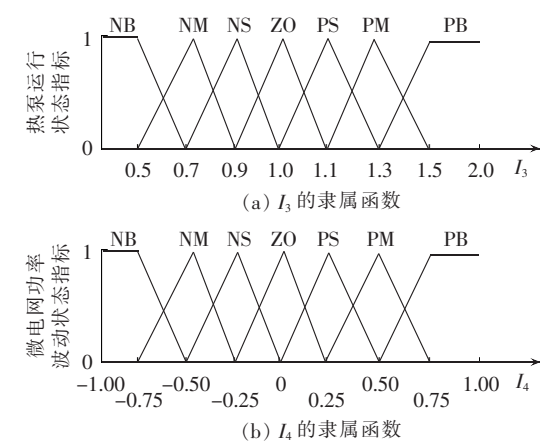


图 6 模糊控制 2 的输入隶属函数
Fig.6 Input membership functions of fuzzy-control-2

$$\Delta P_{\text{pump}}(t)=\Delta P_{\text{pump}}(t-1)+(P_{\text{Flu}}(t)-P_{\text{SC_ref}}(t)-\Delta P_{\text{pump}}(t-1))\mu_2(t) \tag{16}$$

$$P_{\text{B_ref}}(t)=P_{\text{Flu}}(t)-P_{\text{SC_ref}}(t)-\Delta P_{\text{pump}}(t) \tag{17}$$

本模型既考虑了混合储能的自身工作特性,又考虑了热泵状态与微电网功率波动实时状况。模糊控制 1 侧重于混合储能的荷电状态,模糊控制 2 侧重于热泵运行状况以及功率波动对热泵的作用效果,最终求出模糊控制修正系数 $\mu_1(t)$ 与 $\mu_2(t)$,计算出热泵-混合储能的分配功率。此策略能保证微电网的实时功率平衡,同时减少了蓄电池用于平抑功率波动的功率和容量。微电网能量管理策略见图 7,图中 $\text{SOC}_{\text{B_max}}$ 与 $\text{SOC}_{\text{B_min}}$ 分别为蓄电池容量允许上、下限。

3 应用效果分析

3.1 微电网相关参数

以某微电网为例进行分析,其拓扑结构见图 8。该微电网的公共连接点与外部电网相连,微电网包含 4 台装机容量为 250 kW 的双馈风机,1 台容量为 2

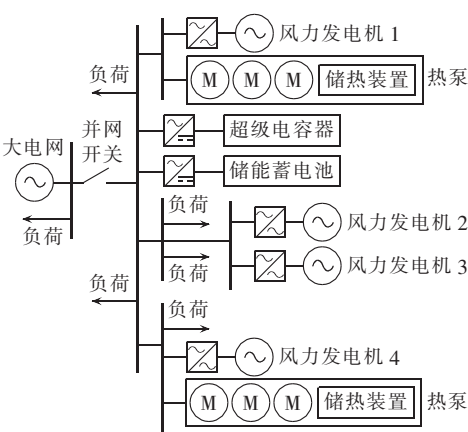


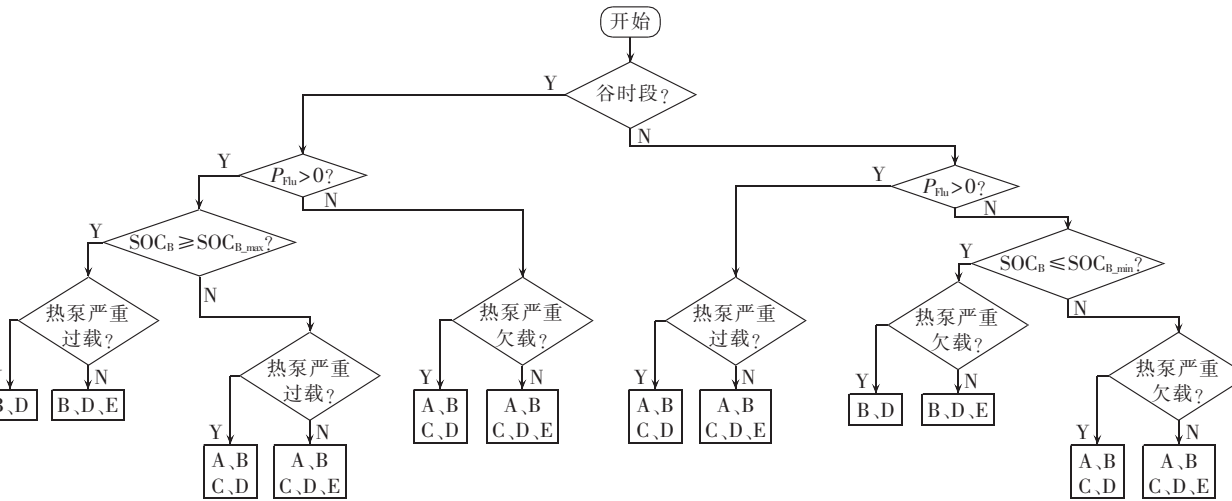
图 8 微电网拓扑结构图
Fig.8 Topology of microgrid

MW·h、初始荷电状态为 70% 的蓄电池储能电站,1 台功率极限为 200 kW、初始荷电状态为 50% 的超级电容。微电网负荷被划分为普通负荷与热泵负荷,热泵容量为 425 kW(负荷情况见表 1)。热泵不一直运行于额定功率,会根据实时功率波动对控制器作出相应调节,热泵效能系数 F_{COP} 设为 4。风电机组输出特性见图 9;微电网负荷需求曲线如图 10 实线所示,负荷具有明显的峰谷特性;微电网相关参数见表 1。

表 1 微电网相关参数			
Table 1 Related parameters of microgrid			
参数类型	具体参数值	参数类型	具体参数值
风电装机容量	1 MW	负荷最小需求量	456 kW
蓄电池组容量	2 MW·h	热负荷最大需求电量	425 kW
超级电容容量	200 kW·h	热负荷最小需求电量	273.6 kW
负荷最大需求量	707.4 kW		

3.2 能量管理优化结果分析

根据能量管理模型,优先对热泵储热容量进行计算。热泵参与能量管理后的微电网负荷曲线见图 10 中虚线,可看出热泵对负荷峰谷特性的调节作用明显。



A—蓄电池削峰填谷, B—热泵削峰填谷, C—蓄电池抑制功率波动, D—超级电容器抑制功率波动, E—热泵抑制功率波动

图 7 微电网能量管理流程图
Fig.7 Flowchart of microgrid energy management

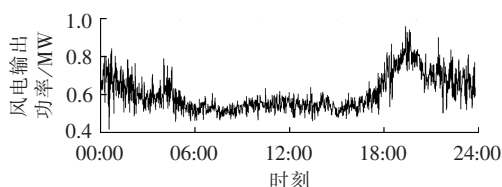


图 9 风电机组的输出特性

Fig.9 Output characteristics of wind generating set

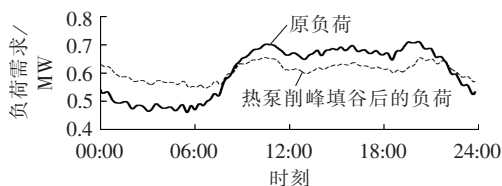


图 10 微电网负荷需求曲线

Fig.10 Load demand curve of microgrid

经计算,压缩机额定功率设计为 360 kW(电功率);热泵储热装置总容量设计为 3.02 MW·h(热容量)。

微电网某时段的功率波动抑制结果如图 11 所示,采用热泵-混合储能对波动功率进行抑制后,功率输出特性得到改善。相比于超级电容和蓄电池,热泵对功率控制信号的响应速度较慢,使用蓄电池配合超级电容对功率波动中的高频成分进行补偿,使用热泵配合蓄电池对剩余功率波动的中低频成分进行平抑。蓄电池既对微电网低频波动进行了平抑,又吸收了经超级电容平抑后的高频剩余成分。

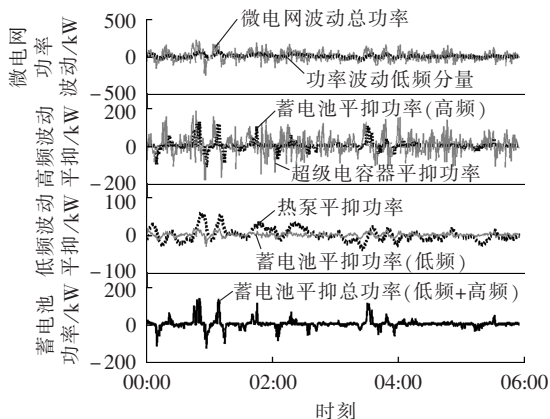


图 11 功率波动抑制结果

Fig.11 Results of power fluctuation suppression

对于功率波动的高频成分,超级电容较长时间单独完成功率波动平抑,蓄电池对高频波动的抑制时间变短。在模糊控制策略的作用下,超级电容充放电转换为 263 次,而蓄电池充放电变换仅为 22 次。图 11 表明高频波动的抑制策略能够有效降低蓄电池充放电次数,有效延长运行寿命。

关于微电网功率波动中低频成分的抑制,从图 11 可以看出,热泵与蓄电池共同对中低频功率波动进行抑制,运行过程中热泵的功率曲线更为平滑,体现出热泵对功率控制信号响应相对较慢的特点,蓄电

池则对剩余功率波动进行补偿。热泵参与微电网功率波动抑制减少了蓄电池的投入容量与充放电输出功率。超级电容、蓄电池与热泵的相互配合,很好地协调并平抑了波动功率,体现了热泵-混合储能功率优化分配模型具备优异的功率波动平抑能力。

若热泵参与微电网的削峰填谷以及功率波动抑制,则蓄电池荷电状态如图 12 所示,可以看出仅需要 0.90 MW·h 蓄电池容量便可参与微电网能量调度;若热泵不参与能量管理,蓄电池荷电状态如图 13 所示,此时需要 1.31 MW·h 容量参与能量调度。由此可得,热泵与混合储能共同参与微电网能量优化可减少 0.41 MW·h 的蓄电池容量。

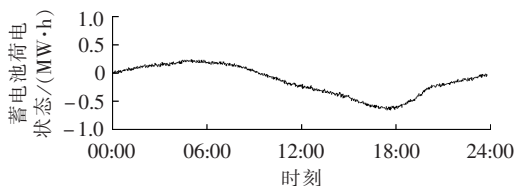


图 12 热泵参与需求侧管理的蓄电池荷电状态

Fig.12 State of charge of battery with heat pump in demand side

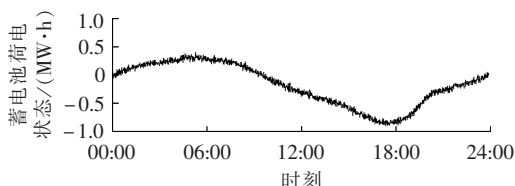


图 13 热泵不参与需求侧管理的蓄电池荷电状态

Fig.13 State of charge of battery without heat pump in demand side

通过计算曲线数据的二阶差分,比较蓄电池充放电功率的实时变化率可知,应用热泵后,图 12 中蓄电池用于平抑波动的功率比图 13 更为平滑,基于热泵-混合储能的能量管理策略实现了减少蓄电池容量、延长储能运行寿命的目标。

4 结论

本文提出一种考虑需求侧管理的微电网能量管理策略,使用热泵配合蓄电池对负荷进行削峰填谷,同时配合蓄电池、超级电容进行功率波动抑制。由于冬季的供暖、热水需求量会直接增加蓄电池总容量,热泵的应用减少了蓄电池容量,削减了储能电站的容量投资成本。热泵配合混合储能对瞬时波动功率进行抑制,延长了蓄电池寿命。将热泵应用于微电网具有显著的可靠性与巨大的经济效益。

参考文献:

- [1] 支娜,肖曦,田培根,等. 微电网控制技术研究与展望[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):107-115.
ZHI Na,XIAO Xi,TIAN Peigen,et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2016, 36(4): 107-115.
- [2] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-14.
WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7-14.
- [3] 张建华,苏玲,陈勇,等. 微网的能量管理及其控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 24-28.
ZHANG Jianhua, SU Ling, CHEN Yong, et al. Energy management of microgrid and its control strategy[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 24-28.
- [4] 郝雨辰,窦晓波,吴在军,等. 微电网分层分布式能量优化管理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 154-162.
HAO Yuchen, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. Hierarchical and distributed optimization of energy management for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 154-162.
- [5] 石庆均,耿光超,江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 26-35.
SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 26-35.
- [6] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6, 184.
DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6, 184.
- [7] TAN X, WU Y, TSANG D H K. Economic analysis of lifetime-constrained battery storage under dynamic pricing[C]//2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. [S.l.]: IEEE, 2013: 726-731.
- [8] KOLLER M, BORSCHKE T, ULBIG A, et al. Defining a degradation cost function for optimal control of a battery energy storage system[C]//Powertech. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-6.
- [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. [S.l.]: IEEE, 2014: 1-5.
- [10] NGUYEN C L, CHUN T W, LEE H H. Determination of the optimal battery capacity based on a life time cost function in wind farm[C]//ECCE. [S.l.]: IEEE, 2013: 51-58.
- [11] 吴雄,王秀丽,崔强. 考虑需求侧管理的微网经济优化运行[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 90-96.
WU Xiong, WANG Xiuli, CUI Qiang. Optimal operation of microgrid considering demand side management[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 90-96.
- [12] 郭思琪,袁越,张新松,等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129.
- [13] KAWACHI S, BABA J, KIKUCHI T, et al. Energy capacity reduction of energy storage system in microgrid stabilized by cascade control system[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications(EPE 2009). [S.l.]: IEEE, 2009: 1-10.
- [14] OBARA S, WATANABE S, RENGARAJAN B. Operation method study based on the energy balance of an independent microgrid using solar-powered water electrolyzer and an electric heat pump[J]. Energy, 2011, 36(8): 5200-5213.
- [15] KAWACHI S, HAGIWARA H, BABA J, et al. Modeling and simulation of heat pump air conditioning unit intending energy capacity reduction of energy storage system in microgrid[C]//Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications(EPE 2011). [S.l.]: IEEE, 2011: 1-9.

作者简介:



施金晓

施金晓(1993—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为微电网、能量管理(E-mail: 18817519355@163.com);

邵能灵(1972—),男,江苏溧水人,教授,博士研究生导师,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。

Energy optimization strategy considering demand-side management for microgrid with heat pump and hybrid energy storage

SHI Jinxiao¹, TAI Nengling¹, LI Ke¹, TANG Yuezhong²

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

2. Southern Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201100, China)

Abstract: A microgrid energy optimization strategy considering the demand-side management is proposed to reduce the total capacity of energy storage system and the action times of battery. Based on the load characteristics of heat pump, a model of heat pump system is established according to the relationship between the heat production and the flow rate of working fluid. The heat storage capacity model is analyzed and calculated according to the daily demand curve of heat load. The power fluctuation of microgrid is divided into high and low frequency components according to the frequency intervals and the fuzzy control theory is adopted to allocate the fluctuated power among heat pumps, batteries and super capacitors. The proposed strategy alleviates the peak and valley loads of microgrid to restrain its power fluctuation for its reliable and economical operation. Case verification proves the correctness and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: microgrid; energy optimization; energy management; demand-side management; heat pump; hybrid energy-storage system; fuzzy control; optimization