

孤岛运行方式下微电网储能系统能量成型控制策略

李朝东¹, 宋蕙慧¹, 曲延滨¹, 金学万²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院, 山东 威海 264209;

2. 仁川国立大学 电气工程系, 韩国 仁川 406772)

摘要: 在分析微电网储能系统(ESS)结构的基础上,建立了微电网 ESS 的端口受控哈密顿(PCH)模型,设计了 PCH 控制器,确定了期望平衡点,给出了微电网 ESS 的能量成型控制策略。建立含可再生能源发电单元和 ESS 的微电网仿真模型对所提策略进行仿真,仿真结果表明,与典型 PI 闭环线性控制策略相比,所提控制策略在孤岛运行期间能很好地满足对 ESS 的控制要求,且具有更好的快速性、鲁棒性。

关键词: 微电网; 孤岛运行; 储能; 可再生能源; 能量成型; 哈密顿系统; 控制; 模型

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.008

0 引言

典型微电网由分布式发电、负荷及储能系统 ESS (Energy Storage System)组成,各单元相互配合形成一个可控制整体^[1]。分布式发电发展为更高级的微电网形式,离不开储能的支撑。随着化石能源的逐渐枯竭及可再生能源的快速发展,在微电网中可再生能源越来越常见,而且所占的比重也不断加大。由于可再生能源发电的固有波动性,要想让微电网维持稳定运行(尤其在孤岛状态下),对 ESS 的性能提出了越来越高的要求^[2]。

ESS 是微电网中重要的能量变换单元,能完成存储介质中的能量和电能的转换,从而维持微电网内部能量的平衡。然而,ESS 的控制性能直接影响微电网的性能。控制策略大致可以分成线性控制和非线性控制两大类。线性控制基于局部线性化模型或使用带有补偿的线性控制器,表现为有限的工作范围或者对参数的依赖;非线性控制不忽略系统的非线性,能够轻易地获得全局稳定性及更好的随动性、鲁棒性^[3-4]。因此理论上,针对 ESS 的多变量及强耦合的非线性特性,更适合采用非线性控制策略。滑模变结构控制^[5]、反步设计法^[6]、模糊控制^[7]等典型非线性控制策略,都在 ESS 的控制中较经典 PI 闭环线性控制取得了一些进步,但仍然存在一些问题,如滑模变结构的振动问题、反步设计法的时延问题、

模糊控制的静特性问题等。而且以上方法都没有考虑系统的互联结构及能量耗散特性,如果将其考虑进去可进一步提高系统性能,故研究新型非线性控制策略具有现实的理论意义^[8]。

近年来,随着非线性控制理论的发展,基于端口受控哈密顿 PCH (Port-Controlled Hamiltonian)系统原理的能量成型控制引起了学者们的关注,它是一种基于无源性理论的非线性鲁棒控制方法,最早应用于机器人运动控制,后来在电力电子系统等领域获得了成功应用^[9]。能量成型控制策略从能量这一物理本质属性出发,将功率变换器看成能量变换装置,依靠互联、向系统注入能量来控制系统的行为^[8],这与 ESS 通过输入输出能量调节微电网行为的特性相一致;另外,这种方法具有很强的鲁棒性和快速性,因此可以预见在 ESS 中能够获得很好的应用。文献^[10]就采用了这一控制策略对三相并网逆变器进行控制,取得了不错的控制效果,且控制器的设计直观简洁。然而针对微电网 ESS,尤其是针对孤岛运行开展的能量成型控制算法研究,国内外还不多见。本文依据 PCH 系统原理以及恒压、恒频控制(U/f 控制)原理,建立了 ESS 的 PCH 模型,设计了能量成型控制器,并与传统 PI 闭环线性控制的控制效果进行了对比,结果表明此控制策略不仅很好地满足了控制要求,而且具有更好的鲁棒性、快速性。

1 系统结构及分析

微电网的控制方案,从整体上可以分类为主从(Master-Slave)控制和对等(Peer to Peer)控制^[11],本文采用主从控制方案。孤岛运行时,ESS 作为整个系统的主电源保持微电网稳定运行,且为其他微源提供电压和频率参考。微电网并网运行时,由于电网电压的支撑作用,控制相对简单且成熟,本文仅研究孤岛运行的情形。

收稿日期:2014-01-20;修回日期:2014-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074086);山东省科技发展计划资助项目(2012GGX10413,2012J14LN92);威海市科技发展计划资助项目(2013DXGJ04);哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(HIT.NSRIF.2014138)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61074086),the Key Project of Science and Technology of Shandong Province(2012GGX10413,2012J14LN92),the Key Project of Science and Technology of Weihai(2013DXGJ04) and the Scientific Research Innovation Foundation in Harbin Institute of Technology(HIT.NSRIF.2014138)

1.1 微电网结构

图 1 给出了本文所研究的微电网结构,整个微电网通过固态开关(SST)和配电网连接;微源由 ESS、可再生能源发电单元组成^[12];负荷 1 为重要负荷,负荷 2 为一般负荷。其中可再生能源发电单元不管是并网还是孤岛状态都采用恒功率控制(PQ 控制),以便实现最大功率点追踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)。ESS 检测微电网状态,在并网时采用 PQ 控制,而在孤岛时采用 U/f 控制。

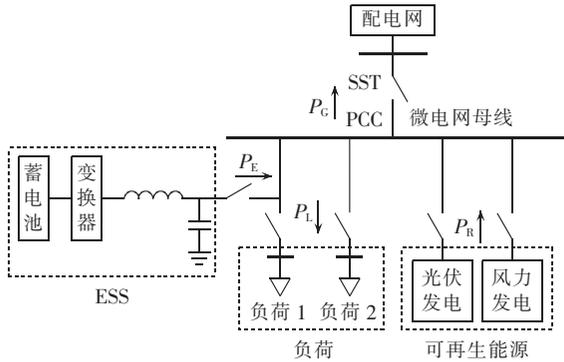


图 1 含可再生能源及储能系统的典型微电网结构
Fig.1 Structure of microgrid containing renewable energy generation units and ESS

1.2 ESS 结构

ESS 采用电压利用率高、控制更为灵活的双级式储能变流器,其具体结构如图 2 所示。

前级采用半桥式双向 DC/DC 直流变换器,通过控制可实现直流功率的双向流动;后级为 DC/AC 逆变整流器,由经典三相全桥电路和 LC 滤波器组成,可实现交直流之间的变换及功率的双向流动。半桥式双向 DC/DC 直流变换器采用互补 PWM 控制方式^[13],以提高动态性能;后级 DC/AC 逆变整流器为提高母线的直流电压利用率采用经典空间矢量脉宽调制(SVPWM)方式。

2 ESS 的 PCH 模型

2.1 PCH 系统

典型非线性系统描述为式(1)。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f(x)$ 、 $h(x)$ 为连续向量函数。

为了方便对系统的分析及能量成型控制策略的实施,需要将系统改写为 PCH 系统模型结构:

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \\ y = g^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x \in \mathbf{R}^n$, 为系统状态变量; $u, y \in \mathbf{R}^m$, 分别为系统共轭的输入、输出端口变量, 其二元积反映系统与外界交互的功率; $R(x) = R^T(x) \geq 0$, 为内部耗散矩阵, 反映系统的阻尼特性; $J(x)$ 、 $g(x)$ 为系统内联结构矩阵, 反映了系统的结构特点; $H(x)$ 为系统能量函数, 即哈密顿(Hamilton)函数, 描述的是系统存储能量的总和^[9]。实际电路系统对应的 PCH 结构中, 每一变量都有特定含义。

2.2 ESS 的 PCH 模型

ESS 按照能量的流动方式, 可以划分为 DC/DC 和 DC/AC 2 级。在前一级, 即 DC/DC 级, 能量以直流方式传递; 在后一级, 即 DC/AC 级, 能量在交流、直流 2 种形式之间转换。

设开关 $V_{T1} - V_{D1}$ 占空比为 d_b , 以电感电流 i_{Lb} 和直流母线(电容 C) 电压 u_{dc} 为状态变量, 利用状态空间平均法, 可得状态方程为:

$$\begin{cases} L_b \frac{di_{Lb}}{dt} = -R_b i_{Lb} - d_b u_{dc} + U_b \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = d_b i_{Lb} - i_o \end{cases} \quad (3)$$

其中, R_b 为 L_b 的等效电阻。

采用等功率坐标变换, 在 dq 坐标系下 DC/AC 级的模型为^[14]:

$$\begin{cases} L_f di_d/dt = s_d u_{dc} - R_f i_d - e_d + \omega L_f i_q \\ L_f di_q/dt = s_q u_{dc} - R_f i_q - e_q - \omega L_f i_d \\ C_f de_d/dt = i_d - i_{gd} + \omega C_f e_q \\ C_f de_q/dt = i_q - i_{gq} - \omega C_f e_d \end{cases} \quad (4)$$

其中, s_d, s_q 分别为 d 轴、 q 轴的占空比函数; i_d, i_q 分别

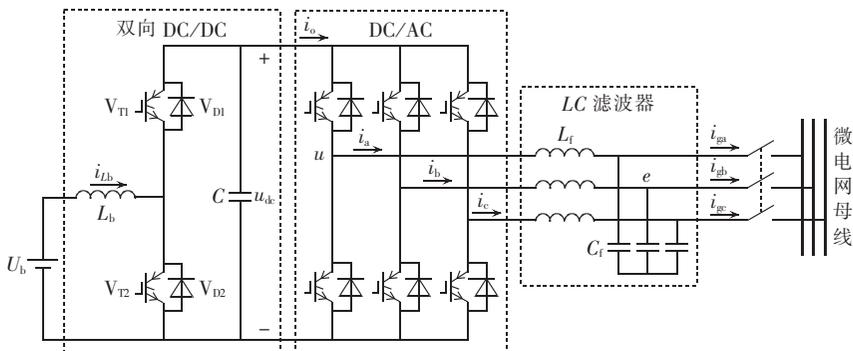


图 2 ESS 主电路结构
Fig.2 Main circuit of ESS

为 i 的 d 轴和 q 轴分量; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为 i_g 的 d 轴和 q 轴分量; e_d 、 e_q 分别为 e 的 d 轴和 q 轴分量; R_f 为 L_f 的等效电阻。

由 KCL 电路定律

$$i_o = s_d i_d + s_q i_q \quad (5)$$

定义系统的状态变量(电感磁通和电容电荷)、输入向量、输出向量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [L_f i_d & L_f i_q & C_f e_d & C_f e_q & L_b i_{Lb} & C u_{dc}]^T \\ \mathbf{u} = [i_{gd} & i_{gq} & U_b]^T \\ \mathbf{y} = [-e_d & -e_q & i_{Lb}]^T \end{cases} \quad (6)$$

系统的 Hamilton 函数为电容和电感能量的总和:

$$H(\mathbf{x}) = (\mathbf{x}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{x}) / 2 \quad (7)$$

其中, $\mathbf{D} = \text{diag}(L_f, L_f, C_f, C_f, L_b, C)$ 。

联立式(3)—(5)并与式(2)进行比较可得:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_f & -1 & 0 & 0 & s_d \\ -\omega L_f & 0 & 0 & -1 & 0 & s_q \\ 1 & 0 & 0 & \omega C_f & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\omega C_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_b \\ -s_d & -s_q & 0 & 0 & d_b & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

3 能量成型控制策略

3.1 PCH 系统控制器设计方法

能量成型控制具体实现方法很多,其中,Ortega 等人提出的互联和阻尼配置控制法求解较为简单且控制效果好。此方法通过构造一个在平衡点 \mathbf{x}^* 处取极小值的 Hamilton 函数 $H_d(\mathbf{x})$, 它为系统引入反馈控制后闭环期望能量函数。寻找反馈控制

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) \quad (11)$$

使闭环耗散系统为

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x}) = \mathbf{R}_d^T(\mathbf{x}) \geq 0 \\ \mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}_d^T(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$ 分别为期望阻尼矩阵和互联矩阵。

定理^[9,15]: 给定 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 、 $H(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 及系统期

望平衡点 \mathbf{x}^* , 若可以找到 $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x})$ 、 \mathbf{J}_a 、 \mathbf{R}_a 和 $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ 满足

$$[\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \mathbf{K}(\mathbf{x}) =$$

$$[\mathbf{J}_a(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_a(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) \quad (14)$$

且同时满足条件 **a—d**, 则系统渐近稳定。

a. 可积性。 $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ 为某一标量函数的梯度, 即:

$$\frac{\partial \mathbf{K}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \left[\frac{\partial \mathbf{K}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \quad (15)$$

b. 平衡点配置。 $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ 在平衡点 \mathbf{x}^* , 有:

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}^*) = -\frac{\partial H(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}} \Leftrightarrow \frac{\partial H_d(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}} = 0 \quad (16)$$

c. 李雅普诺夫稳定性。 $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}^* 处的雅可比矩阵

$$\frac{\partial \mathbf{K}(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}} > -\frac{\partial^2 H(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^2} \Leftrightarrow \frac{\partial^2 H_d(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^2} > 0 \quad (17)$$

$$\left\{ \mathbf{K}(\mathbf{x}) = -\frac{\partial H_a(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right. \quad (18)$$

$$\left. H_d(\mathbf{x}) = H(\mathbf{x}) + H_a(\mathbf{x}) \right\}$$

其中, $H_a(\mathbf{x})$ 为通过控制注入的能量, 为一待定函数。则闭环系统式(18)为一耗散的 PCH 系统, \mathbf{x}^* 为系统一个稳定的平衡点。

d. 包含在

$$\left\{ \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \left| \left[\frac{\partial^2 H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right]^T \mathbf{R}_d(\mathbf{x}) \frac{\partial^2 H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} > 0 \right. \right\} \quad (19)$$

中的闭环系统最大不变集为 $\{\mathbf{x}_0\}$ 。

3.2 期望平衡点的确定

ESS 的控制目标为: 直流母线(直流侧电容)电压稳定, 即 $u_{dc}^* = U_{dc}$; 微电网母线(滤波电容)电压为稳定的三相对称正弦电压, 在 dq 坐标系下表现为 $e_d^* = E_d$, $e_q^* = E_q$; 系统所有状态变量都能稳定, 即 $\dot{\mathbf{x}}|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = 0$ 。

可以得到:

$$\begin{cases} s_d^* U_{dc} - R_f i_d^* - E_d + \omega L_f i_q^* = 0 \\ s_q^* U_{dc} - R_f i_q^* - E_q - \omega L_f i_d^* = 0 \\ i_d^* - i_{gd} + \omega C_f E_q = 0 \\ i_q^* - i_{gq} - \omega C_f E_d = 0 \\ -R_b i_{Lb}^* - d_b^* U_{dc} + U_b = 0 \\ d_b^* i_{Lb}^* - s_d^* i_d^* - s_q^* i_q^* = 0 \end{cases} \quad (20)$$

解式(20)得:

$$\begin{cases} i_d^* = i_{gd} - \omega C_f E_q \\ i_q^* = i_{gq} + \omega C_f E_d \\ i_{Lb}^* = (U_b - A) / (2R_b) \\ A = \sqrt{U_b^2 - 4R_b(R_f i_d^{*2} + R_f i_q^{*2} + E_d i_d^* + E_d i_q^*)} \end{cases} \quad (21)$$

故系统的期望平衡点为:

$$\mathbf{x}^* = [i_d^* \quad i_q^* \quad E_d \quad E_q \quad i_{Lb}^* \quad U_{dc}]^T \quad (22)$$

3.3 控制器设计

取系统的能量函数为:

$$H_d(\mathbf{x}) = \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{D}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)}{2} \quad (23)$$

取 $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ 为:

$$J_a(x) = \begin{bmatrix} 0 & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ -J_{12} & 0 & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ -J_{13} & -J_{23} & 0 & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ -J_{14} & -J_{24} & -J_{34} & 0 & J_{45} & J_{46} \\ -J_{15} & -J_{25} & -J_{35} & -J_{45} & 0 & J_{56} \\ -J_{16} & -J_{26} & -J_{36} & -J_{46} & -J_{56} & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$R_a(x) = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \quad (25)$$

将式(6)—(13)、(18)、(21)—(25)代入式(14)得控制方程和平衡方程组分别如式(26)、(27)所示。

$$\begin{cases} s_d = [R_1 i_d^* - R_1 (i_d - i_d^*) + J_{12} (i_q - i_q^*) - \\ \omega L_f i_q^* + J_{13} (e_d - e_d^*) + J_{14} (e_q - e_q^*) + \\ J_{15} (i_{Lb} - i_{Lb}^*) + J_{16} (u_{dc} - u_{dc}^*)] / U_{dc} \\ s_q = [R_1 i_q^* - R_1 (i_q - i_q^*) - J_{12} (i_d - i_d^*) + \\ J_{23} (e_d - e_d^*) + \omega L_f i_d^* + J_{24} (e_q - e_q^*) + \\ J_{25} (i_{Lb} - i_{Lb}^*) + J_{26} (u_{dc} - u_{dc}^*)] / U_{dc} \\ d_b = [U_b - R_b i_{Lb}^* + J_{15} (i_d - i_d^*) + J_{25} (i_q - i_q^*) + \\ J_{35} (e_d - e_d^*) + J_{45} (e_q - e_q^*) + \\ R_4 (i_{Lb} - i_{Lb}^*) - J_{56} (u_{dc} - u_{dc}^*)] / U_{dc} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} [-i_d^* - J_{13} (i_d - i_d^*) - J_{23} (i_q - i_q^*) - \\ \omega C_f e_q^* - R_2 (e_d - e_d^*) + J_{34} (e_q - e_q^*) + \\ J_{35} (i_{Lb} - i_{Lb}^*) + J_{36} (u_{dc} - u_{dc}^*) + i_{gd}] = 0 \\ [-i_q^* - J_{14} (i_d - i_d^*) - J_{24} (i_q - i_q^*) + \\ \omega C_f e_d^* - J_{34} (e_d - e_d^*) - R_3 (e_q - e_q^*) + \\ J_{45} (i_{Lb} - i_{Lb}^*) + J_{46} (u_{dc} - u_{dc}^*) + i_{gq}] = 0 \\ [s_d i_d^* - J_{16} (i_d - i_d^*) + s_q i_q^* - J_{26} (i_q - i_q^*) - \\ J_{36} (e_d - e_d^*) - J_{46} (e_q - e_q^*) - d_b i_{Lb}^* - \\ J_{56} (i_{Lb} - i_{Lb}^*) + R_5 (u_{dc} - u_{dc}^*)] = 0 \end{cases} \quad (27)$$

由平衡方程组(27)前2个方程解得:

$$J_{13} = J_{23} = J_{34} = J_{35} = J_{36} = J_{14} = J_{24} = J_{45} = J_{46} = R_2 = R_3 = 0$$

由平衡方程组(27)第3个方程解得:

$$\begin{cases} -R_1 i_d^* - J_{12} i_q^* - J_{15} i_{Lb}^* - J_{16} u_{dc}^* = 0 \\ J_{12} i_d^* - R_1 i_q^* - J_{25} i_{Lb}^* - J_{26} u_{dc}^* = 0 \\ J_{15} i_d^* + J_{25} i_q^* - R_4 i_{Lb}^* - J_{56} u_{dc}^* = 0 \\ J_{16} i_d^* + J_{26} i_q^* + J_{56} i_{Lb}^* - R_5 u_{dc}^* = 0 \end{cases} \quad (28)$$

为使平衡方程组成立,且便于方程求解,令非开关函数对应项取0,即 $J_{12} = J_{15} = J_{25} = 0$,解得:

$$\begin{cases} J_{16} = -R_1 i_d^* / u_{dc}^* \\ J_{26} = -R_1 i_q^* / u_{dc}^* \\ J_{56} = -R_4 i_{Lb}^* / u_{dc}^* \end{cases} \quad (29)$$

此时控制方程式(26)简化为:

$$\begin{cases} s_d = \frac{R_1 i_d^* - R_1 (i_d - i_d^*) - \omega L_f i_q^* + E_d + J_{16} (u_{dc} - U_{dc})}{U_{dc}} \\ s_q = \frac{R_1 i_q^* - R_1 (i_q - i_q^*) + \omega L_f i_d^* + E_q + J_{26} (u_{dc} - U_{dc})}{U_{dc}} \\ d_b = \frac{U_b - R_b i_{Lb}^* + R_4 (i_{Lb} - i_{Lb}^*) - J_{56} (u_{dc} - U_{dc})}{U_{dc}} \end{cases} \quad (30)$$

4 仿真实验

为验证能量成型控制算法的有效性,按照原理图3在MATLAB/Simulink环境下搭建整个微电网仿真模型,仿真参数如表1所示。

孤岛模式下,图3中并网开关断开。能量成型控制算法首先检测系统的状态量,由式(21)计算出系统期望的平衡点,再根据控制方程式(30)得到系统的开关函数,开关函数经PWM实现对系统被控量的控制。其中,阻尼参数的设置见表1,互联参数根据式(29)得到,静止旋转坐标变换所用相位角 θ_{ref} 由系统给定^[12],蓄电池采用通用等效电路模型^[16],ESS容量由蓄电池容量限定,参数详见表1。

为验证能量成型控制的优势,用经典PI闭环线性控制做对照。前后级都采用典型电压外环电流内环的双闭环控制,电路结构及参数设置与能量成型控制时一致,控制框图如图4所示^[17-18]。

可再生能源由采用PQ控制的光伏发电单元和风力发电单元两部分混合组成,用受控电流源模型模拟它们对外特性^[19]。通过功率指令 P_{Ref} 的频繁变化,模拟实际微电网系统中可再生发电的输出功率随天气条件等因素频繁波动。指令值 Q_{Ref} 始终为0,以模拟实际可再生能源发电单元的单位功率因数运行。

仿真算例:在0.1s时刻光伏发电单元接入微电网系统,0.2s时刻一般负荷2从微电网脱离;0.35s风力发电单元从微电网脱离;0.38~0.5s光照逐渐减弱,直到光伏单元停止工作。

图5为能量成型控制下微电网中各单元输出功率波形,由于PI闭环控制时波形基本一致,不再给出PI闭环控制时的波形。可以看出在2种控制策略的作用下,ESS都能够迅速追踪供需侧功率的差额,以维持微电网功率的平衡,从而保证微电网孤岛状态的稳定运行。

图6分别为能量成型控制和PI闭环控制时ESS输出电流的波形。由图6可见,2种控制方式下ESS输出电流波形都接近理想正弦波,在负荷变化时都能快速追踪,控制效果也无明显差别。

图7为能量成型控制和PI闭环控制时,ESS直流母线电压波形。整体而言,两者的控制效果无显著差别,甚至PI控制的快速性更好、超调也更小。但经过仔细观察不难发现,在0.38s之后,由于可再生能源的出力线性减小,ESS的输出功率也呈斜坡

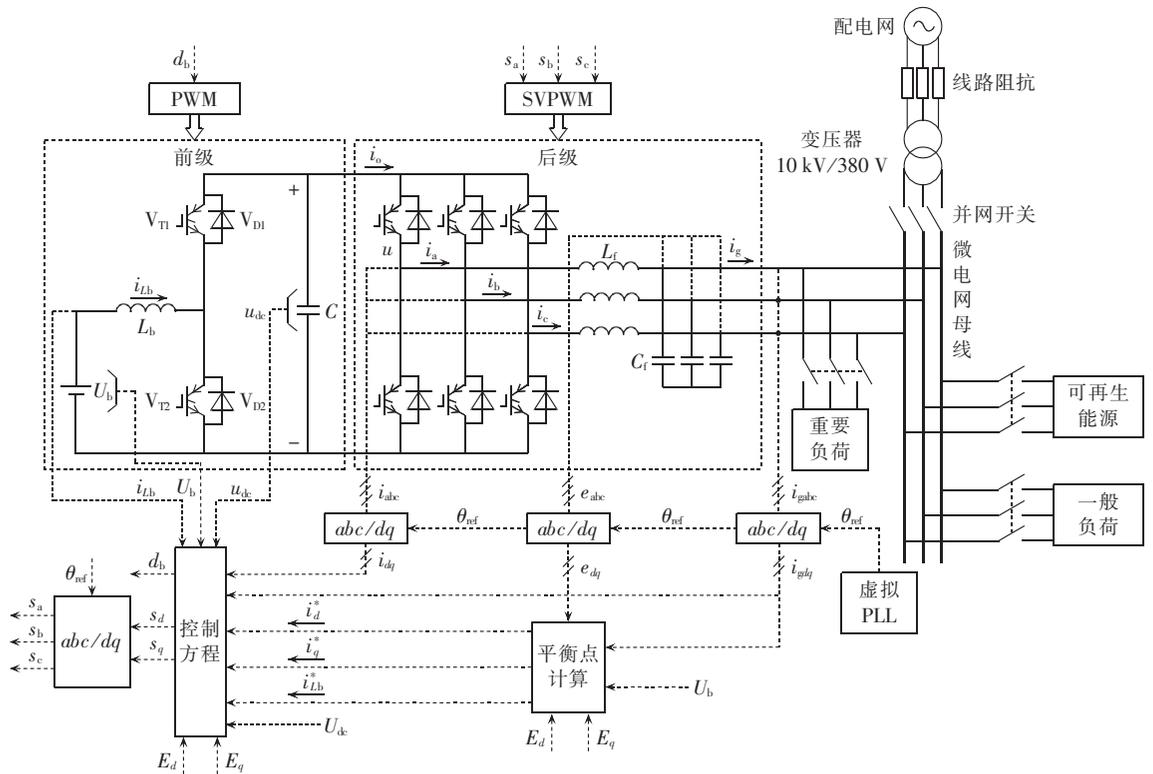


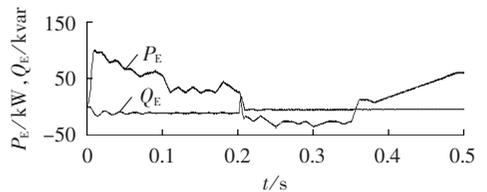
图 3 能量成型控制原理

Fig.3 Principle of energy-shaping control

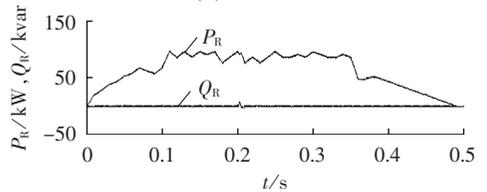
表 1 微电网仿真模型参数

Table 1 Parameters of microgrid for simulation

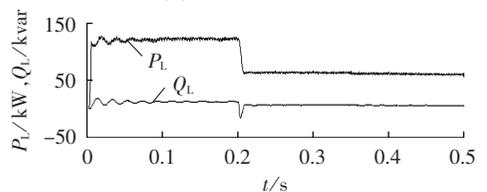
| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-------------------------|--------|-------------------|------|
| 电池额定容量/(A·h) | 2500 | 微电网相电压有效值/V | 220 |
| 电池额定功率/(kV·A) | 150 | 微电网电压额定频率/Hz | 50 |
| 电池额定电压 U_{bN}/V | 300 | DC/AC 开关频率/kHz | 5 |
| 电池额定输出电流/A | 500 | DC/DC 开关频率/kHz | 10 |
| 电池内阻/ Ω | 0.0012 | 阻尼参数 R_1/Ω | 0.1 |
| 电感 L_b/mH | 0.6 | 阻尼参数 R_4/Ω | 0.01 |
| L_b 等效电阻 R_b/Ω | 0.1 | 虚拟锁相环频率/Hz | 50 |
| 可再生能源容量/kW | 130 | 重要负荷额定有功/kW | 60 |
| 稳压电容 C/mF | 5 | 重要负荷额定无功/kvar | 5 |
| 滤波电容 $C_f/\mu F$ | 75 | 一般负荷额定有功/kW | 60 |
| 滤波电感 L_f/mH | 0.8 | 一般负荷额定无功/kvar | 6 |



(a) ESS 输出功率



(b) 可再生能源输出功率



(c) 负荷消耗功率

图 5 微电网各单元功率波形

Fig.5 Power waveform for different microgrid units

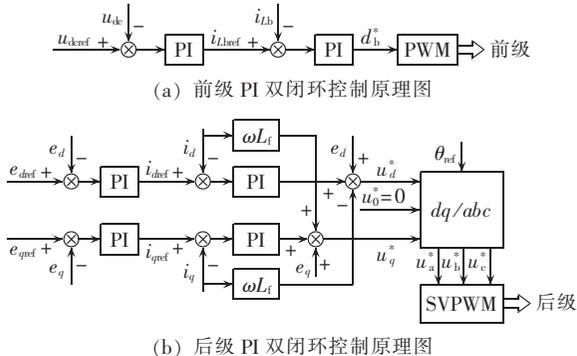
将 0.38 s 之后 2 种控制下直流母线电压的波形局部放大如图 8 所示。

图 9 为能量成型控制和 PI 闭环控制方式下微电网母线电压波形,由图可见,2 种控制的控制效果都较理想。但同样会发现在 0.38 s 之后,由于 ESS 输出功率的斜坡变化,也导致 PI 控制的追踪效果不佳,

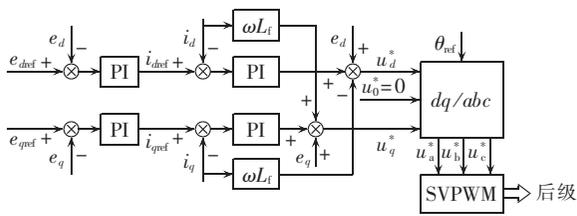
变化,此时 PI 控制的控制效果不佳,直流母线电压也逐渐偏离给定值。为了更明显地观察这一现象,

图 4 PI 闭环控制原理

Fig.4 Principle of PI closed-loop control



(a) 前级 PI 双闭环控制原理图



(b) 后级 PI 双闭环控制原理图

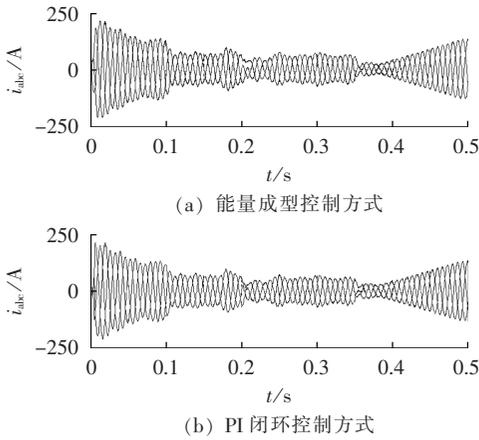


图 6 ESS 输出电流波形

Fig.6 Waveforms of ESS output current

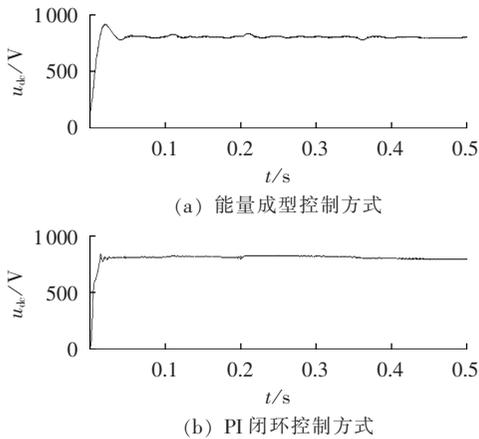


图 7 直流母线电压波形

Fig.7 Waveforms of DC bus voltage

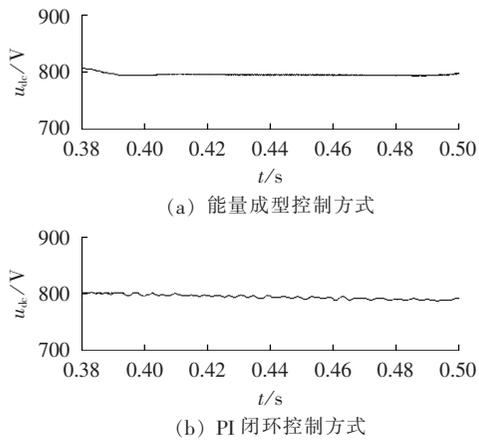


图 8 直流母线电压波形局部放大图

Fig.8 Partial of enlarged DC bus voltage

微电网母线电压也逐渐偏离给定值。为了更为明显地观察这一现象,将 0.38 s 之后 2 种控制下 d 轴电压波形的局部进行放大如图 10 所示,在等功率静止旋转坐标变化下, e_d 的指令值为 380 V。

图 11 为能量成型控制和 PI 闭环控制方式下微电网频率波形,可见 2 种控制都能实现频率的有效控制,但不难发现能量成型控制方式下的频率波动更小。

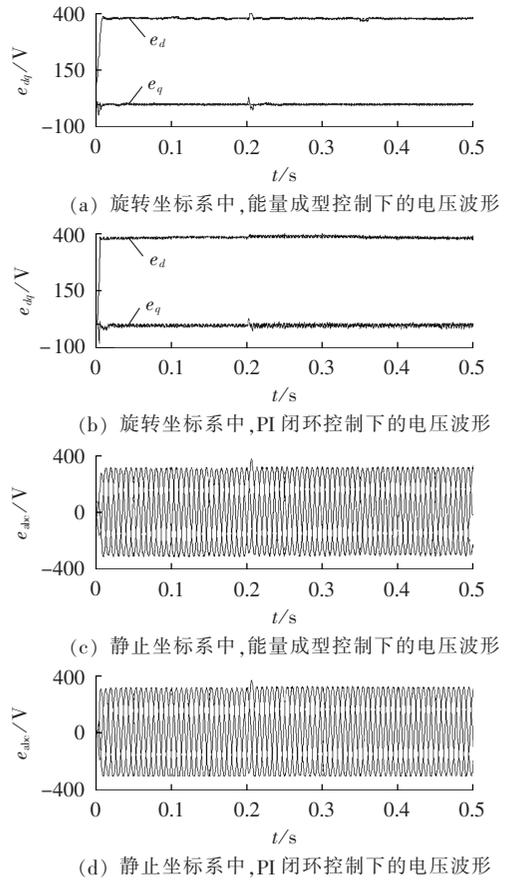


图 9 微电网电压波形

Fig.9 Waveforms of microgrid voltage

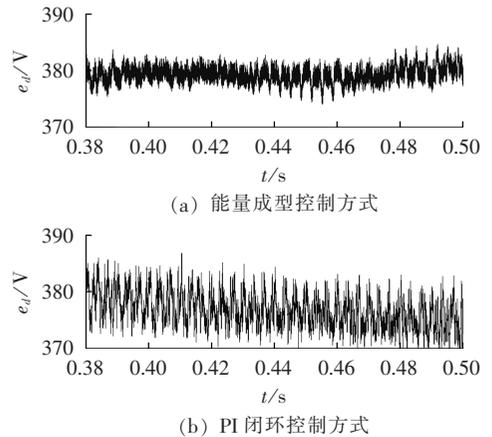


图 10 微电网电压波形局部放大图

Fig.10 Partial of enlarged microgrid voltage

由以上仿真波形及分析不难看出,虽然负荷剧烈变化,基于能量成型控制和 PI 闭环控制的控制策略都能让微电网电压和频率保持稳定,实现孤岛运行时的 U/f 控制。二者控制效果大致相同,但是当负荷出现斜坡变化等剧烈变化时,PI 闭环控制策略则会出现较大的误差,且误差随时间推移会逐渐增大。因此不难得出结论,能量成型控制的跟踪能力要优于 PI 闭环线性控制。

在仿真实验的过程中也发现,PI 闭环控制的参

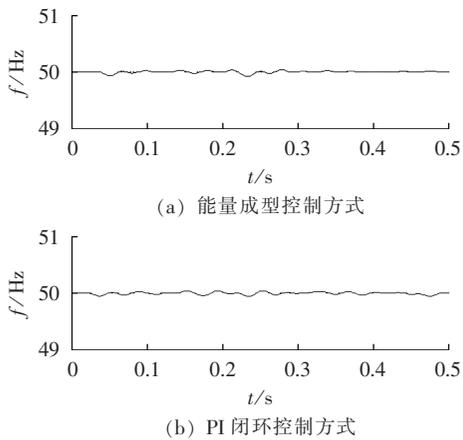


图 11 微电网频率

Fig.11 Frequency of microgrid

数难以整定,即使采用工程整定或者其他方法得到的参数,在实际中也需要进行调整才能获得较为理想的控制效果。在本文的 ESS 中,PI 闭环控制策略需要用到 3 个 PI 双闭环,每个双闭环有 2 个 PI 调节器,每个 PI 调节器有 K_p 、 K_i 这 2 个参数,这样一共就有 12 个参数,参数的微小差异会对 PI 闭环的控制效果产生很大的影响,参数整定是一件复杂的工作。另外,仿真调试好的参数用在实际系统中,或者运行环境改变的情况下,都有可能出现控制效果不理想的情况。而在 ESS 中采用能量成型控制策略,只需对其中的 2 个参数进行整定,且由于 ESS 自身的渐近稳定性,对参数也不敏感,控制参数的整定变得十分容易。因此,能量成型控制策略在跟踪性能及鲁棒性等方面,较经典 PI 闭环线性控制策略也有很大的优势。

5 结论

ESS 在微电网中具有非常重要的地位,尤其是微电网孤岛运行维持稳定的关键,但是也对 ESS 的控制性能提出了很高的要求。

本文针对微电网孤岛运行状态,采用双级式储能变流器经 LC 滤波的主电路结构,利用基于 PCH 系统原理的能量成型控制方法设计了用于实现 U/f 控制的 ESS 能量成型控制器;搭建了包含 ESS、可再生能源发电及可变负荷单元的微电网仿真模型,对能量成型控制策略的控制效果与传统 PI 闭环线性控制策略的控制效果进行了比较,仿真结果表明能量成型策略不仅能够保证微电网在孤岛状态下的稳定运行,而且较 PI 闭环控制有着更好的跟踪负荷的能力和鲁棒性,参数易于整定。基于 PCH 系统原理的能量成型控制方法,为提高 ESS 的控制性能提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] LASSETER R H. Microgrids[C]//2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA:IEEE,2002:305-308.
- [2] CAISHENG W,NEHRIR M H. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/full cell energy system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(3):957-967.
- [3] DANNEHL J,WESSELS C,FUCHS F W. Limitations of voltage-oriented PI current control of grid connected PWM rectifiers with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(2):380-388.
- [4] LEE T S. Lagrangian modeling and passivity-based control of three-phase AC/DC voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2004,51(4):892-896.
- [5] LIU F C,LIU J J,ZHANG B. Energy management of Hybrid Energy Storage System(HESS) based on sliding mode control[C]//2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC). Harbin, China:IEEE,2012:406-410.
- [6] ALLAG A,HAMMOUDI M Y,MIMOUNE S M,et al. Tracking control via adaptive back stepping approach for a three phase PWM AC-DC converter[C]//2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics(ISIE). Vigo, Spain:IEEE,2007:371-376.
- [7] CECATI C,AQUILA A D,LECCI A,et al. Implementation issues of a fuzzy-logic-based three-phase active rectifier employing only voltage sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2005,52(2):378-385.
- [8] YU H S,TENG Z B,YU J P,et al. Energy-shaping and passivity-based control of three-phase PWM rectifiers[C]//2012 10th World Congress on Intelligent Control and Automation(WCICA). Beijing, China:IEEE,2012:2844-2846.
- [9] ORTEGA R,van der SCHAFT A J,MASCHKE B,et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian system[J]. IEEE Automatica,2002,38(4):585-596.
- [10] SERRA F M,DE ANGELO C H,FORCHETTI D G. IDA-PBC control of a three-phase front-end converter[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada:IEEE,2012:5203-5208.
- [11] 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):24-29.
ZHANG Jianhua,SU Ling,CHEN Yong,et al. Energy management of microgrid and its control strategy[J]. Power System Technology,2011,35(7):24-29.
- [12] 唐西胜,邓卫,齐志平. 基于储能的微电网/离网无缝切换技术[J]. 电工技术学报,2011,26(增刊 1):280-282.
TANG Xisheng,DENG Wei,QI Zhiping. Research on grid-connected/islanded seamless transition of microgrid based on energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(Supplement 1):280-282.
- [13] 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 Guojun,TANG Xisheng,ZHOU Long,et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in supercapacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(6):15-21.
- [14] 沈阳武,彭晓涛,杨军,等. 超级电容器储能系统的功率实时控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):28-33.
SHEN Yangwu,PENG Xiaotao,YANG Jun,et al. Real-time

- power control of ultracapacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 28-33.
- [15] 于海生,赵克友,郭雷,等. 基于端口受控哈密顿方法的 PMSM 最大转矩电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 82-87. YU Haisheng, ZHAO Keyou, GUO Lei, et al. Maximum torque per ampere control of PMSM based on port-controlled Hamiltonian theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 82-87.
- [16] TREMBLAY O, DESSAINT L A, DEKKICHE A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles [C]//2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Arlington, TX, USA: IEEE, 2007: 284-289.
- [17] YU X W, JIANG Z H, ZHANG Y. Control of parallel inverter-interfaced distributed energy resources [C]//2008 IEEE Energy 2030 Conference. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [18] de la VELASCO FUENTE D, RODRIGUEZ C L T, et al. Photovoltaic power system with battery backup with grid-connection and islanded operation capabilities [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1571-1581.
- [19] 曹相芹,鞠平,蔡昌春. 微电网仿真分析与等效化简[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 96-98.

CAO Xiangqin, JU Ping, CAI Changchun. Simulative analysis and equivalent reduction for micro-grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 96-98.

作者简介:



李朝东

李朝东(1989—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事微电网以及储能系统方面的研究;

宋蕙慧(1983—),女,黑龙江大庆人,讲师,博士,主要从事风力发电、能量成型控制等方面的研究;

曲延滨(1961—),男,山东牟平人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事控制理论与应用、非线性控制、新能源发电、微电网运行控制、储能系统等方面的研究(E-mail: quyanbin@hit.edu.cn);

金学万(1966—),男,韩国仁川人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事微电网、可再生能源系统、能量存储系统、HVDC 和 FACTS 等方面的研究(E-mail: hmkim@incheon.ac.kr)。

Strategy of energy-shaping control for microgrid energy storage system in islanding operation mode

LI Chaodong¹, SONG Huihui¹, QU Yanbin¹, KIM Hakman²

(1. School of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China;

2. Department of Electrical Engineering, National University of Incheon, Incheon 406772, Korea)

Abstract: The PCH (Port-Controlled Hamiltonian) model of microgrid ESS (Energy Storage System) in islanding operation mode is built based on the analysis of its structure, its PCH controller is designed, its expecting equilibrium point is determined and its energy-shaping control strategy is given. A microgrid model containing the renewable energy generation unit and ESS is established for the simulation of proposed energy-shaping control strategy and results show that, compared to the classical PI close-loop linear control, it meets the control requirements of microgrid ESS for the islanding operation with better rapidity and robustness.

Key words: microgrid; islanding operation; energy storage; renewable energy resources; energy-shaping; Hamiltonian system; control; models