

基于事件触发的直流微电网无差拍预测控制

王本斐¹ 张荣辉^{1,2} 冯国栋¹ Manandhar Ujjal³ 郭戈⁴

摘要 针对光伏 (Photovoltaic, PV)-电池-超级电容直流微电网系统中光伏发电间歇性造成的功率失配问题, 提出一种基于事件触发的无差拍预测控制 (Event-triggered deadbeat predictive control, ETDPC) 方法, 以实现有效的能量管理. ETDPC 方法结合事件触发控制策略和无差拍预测控制策略 (Deadbeat predictive control, DPC) 的优点, 根据微电网的拓扑结构构建状态空间模型, 用于设计适用于微电网能量管理的触发条件: 当 ETDPC 的触发条件满足时, ETDPC 中无差拍预测控制模块被激活, 可以在一个控制周期内产生最优控制信号, 实现对于扰动的快速响应, 减小母线电压纹波; 当系统状态不满足 ETDPC 中的触发条件时, 无差拍预测控制模块被挂起, 从而消除非必要运算, 以减轻实现能量管理的运算负担. 因此, 对于电池-超级电容器混合储能系统 (Hybrid energy storage system, HESS), ETDPC 能够缓解间歇性光伏发电与负荷需求之间的功率失衡, 以稳定母线电压. 最后, 数字仿真和硬件在环 (Hardware-in-loop, HIL) 实验结果表明, 相较于传统无差拍控制方法, 运算负担减小了 50.63%, 母线电压纹波小于 0.73%, 验证了 ETDPC 方法的有效性与性能优势, 为直流微电网的能量管理提供了一种参考.

关键词 微电网, 光伏, 混合储能系统, 事件触发控制, 无差拍预测控制

引用格式 王本斐, 张荣辉, 冯国栋, Manandhar Ujjal, 郭戈. 基于事件触发的直流微电网无差拍预测控制. 自动化学报, 2024, 50(3): 475-485

DOI 10.16383/j.aas.c210585

Event-triggered Deadbeat Predictive Control for DC Microgrid

WANG Ben-Fei¹ ZHANG Rong-Hui^{1,2} FENG Guo-Dong¹ MANANDHAR Ujjal³ GUO Ge⁴

Abstract This paper presents an event-triggered deadbeat predictive control (ETDPC) method for the mitigation of power mismatch in a photovoltaic (PV)-battery-supercapacitor microgrid. The proposed ETDPC method combines the event-triggered control strategy and the deadbeat predictive control (DPC) strategy and inherits their advantages accordingly. Based on the topology of the DC microgrid, the state-space model can be built for the design of the triggering condition for the energy management: When the triggering condition of ETDPC is activated, the deadbeat control block of ETDPC will be conducted and the optimal control signal can be generated within one control cycle, so that the DC bus voltage ripple can be reduced based on the fast response to the disturbance; When the state of the DC microgrid cannot satisfy the triggering condition, the deadbeat control block of ETDPC will be suspended to eliminate the redundant computations, so that the computational burden of the DC microgrid energy management can be reduced. Therefore, ETDPC can be fully utilized for battery-supercapacitor hybrid energy storage system (HESS) to mitigate the power unbalance between the load demand and the intermittent photovoltaic power generation and stabilize the bus voltage. To validate the effectiveness of the method, various simulations and hardware-in-loop (HIL) experiments are conducted based on a digital simulation system and the HIL platform, which show that the computational burden is reduced by 50.63% compared to the conventional deadbeat predictive control and the voltage ripple is regulated less than 0.73% of the reference. This work provides a reference of the control strategy for microgrid energy management.

Key words Microgrid, photovoltaic (PV), hybrid energy storage system (HESS), event-triggered control, deadbeat predictive control (DPC)

Citation Wang Ben-Fei, Zhang Rong-Hui, Feng Guo-Dong, Manandhar Ujjal, Guo Ge. Event-triggered deadbeat predictive control for DC microgrid. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(3): 475-485

收稿日期 2021-06-28 录用日期 2021-11-02

Manuscript received June 28, 2021; accepted November 2, 2021
国家自然科学基金 (52172350, 51775565), 深圳市科技计划 (RCBS20200714114920122), 广州市科技计划项目 (2024B01W0079) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (52172350, 51775565), Shenzhen Science and Technology Program (RCBS20200714114920122), and Guangzhou Science and Technology Plan Project (2024B01W0079)

本文责任编辑 梅生伟

Recommended by Associate Editor MEI Sheng-Wei

1. 中山大学智能工程学院 深圳 518000 中国 2. 中山大学广东省

智能交通系统重点实验室 广州 510275 中国 3. 南洋理工大学电气与电子工程学院 新加坡 308232 新加坡 4. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110004 中国

1. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518000, China 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transport System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 308232, Singapore 4. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China

近年来, 由于传统化石能源枯竭以及其使用所带来严重的环境污染问题, 各国政府大力发展各类可再生能源发电技术^[1-2], 包含风力发电和光伏 (Photovoltaic, PV) 发电在内, 微电网承担大量的分布式可再生能源接入任务^[2-3]. 由于受到环境的影响, 可再生能源发电具有间歇性, 而且微电网中的负载也因时间和外界因素时刻变化, 因此通常会安装储能系统. 储能系统在发电量充沛时存储电能, 发电量紧缺时释放电能, 用以平衡微电网中可再生能源发电与负载之间的功率失配, 稳定母线电压^[3-4]. 此外, 由于微电网中出现电动汽车这类新型负载, 产生了高功率和高能量的需求. 因此, 利用电池的高能量密度特性和超级电容的高能量密度特性, 将二者结合成为混合储能系统 (Hybrid energy storage system, HESS), 从而提供近似理想储能系统的功能以更好地响应微电网中的负载需求^[4].

随着世界范围内的微电网装机量的快速增加, 涌现了大量针对微电网能量管理控制策略的研究工作^[5-20]. 文献 [5] 提出基于分布式策略的下垂控制方法, 将微电网的负载共享和电压平衡问题转化为多目标优化问题, 实现了系统层面的最优平衡, 并利用邻居节点间的信息交换降低通信需求. 文献 [6-8] 针对使用同种拓扑结构的变换器实现多个分布式能源并联接入微电网的情况, 利用基于协同控制理论的能量管理算法, 最终实现电流均衡控制. 基于规则的能量管理策略也被应用于微电网中^[9-11], 该策略依据负载和可再生能源的功率差异值决定系统的工作模式, 进而在各模式下产生储能设备的电流目标值, 实现功率平衡和母线电压稳定. Xiao 等^[12-13] 针对包含多种储能电池的微电网提出多级能量控制策略, 在各级分别实现混合储能系统的分布式控制、功率分配补偿和母线电压控制, 以及荷电状态恢复控制. 基于滑模控制的策略应用于微电网能量管理^[14-15], 文献 [14] 在滑模控制中采用固定开关频率, 实现微电网能量管理的同时降低了电路器件的设计难度; Wang 等^[15] 结合滑模控制和滞环控制, 有效地消除了微电网多模式下混合储能系统的电流波动.

上述能量管理策略中, 在系统层面采用下垂控制和滑模控制等高级控制方法, 然而在变换器控制层面多利用线性控制方法, 面对非线性系统鲁棒性不足、动态响应差, 并存在无法引入边界条件的缺陷^[6]. 为克服上述工作存在的不足和缺陷, 文献 [17-19] 则基于模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 方法实现微电网能量管理, 通过建立系统状态模型和合理的目标方程, 可以在每个控制周期通

过优化求解最优控制动作, 并充分考虑引入边界条件. 具体体现为: 当微电网中的可再生能源发电功率或者负载功率产生波动时, 采用 MPC 方法的微电网母线电压产生纹波较传统线性控制方法更小, 恢复到稳态耗时更短^[17]; 同时采用 MPC 方法在求解最优控制动作时, 可以考虑控制电流的上下限以保证电感电流不超过电感饱和电流和储能设备的额定电流^[20], 保证微电网正常运行.

然而由于 MPC 方法需要进行实时在线预测和优化, 涉及大量的矩阵运算, 导致其对于计算资源需求苛刻, 计算负担沉重. 为了降低 MPC 方法带来的计算负担, 研究者进行相关研究: 另一种预测控制方法——无差拍预测控制 (Deadbeat predictive control, DPC) 在微电网中得到运用^[21], 其具有类似 MPC 方法的动态响应速度, 通过建立输出变量和控制变量的函数关系, 在一个控制周期内进行最后控制变量的求解, 可以避免大量矩阵运算, 从而显著降低计算负担; 文献 [22] 则在 MPC 方法中引入事件触发控制 (Event-triggered control), 通过设置合理的触发条件, 只有在必要时激活模型预测控制运算, 从而通过优化预设的代价方程直接产生开关控制信号, 因此可以在保证系统性能的前提下消除非必要的矩阵运算来降低计算量, 同时减少非必要开关动作.

综上所述, 在传统基于 DPC 的能量管理策略的研究基础上^[20], 受文献 [21] 启发, 本文提出基于事件触发无差拍预测控制 (Event-triggered deadbeat predictive control, ETDPC) 的微电网能量管理策略, 进一步提升能量管理性能. 该策略在保证微电网有效运行的同时, 通过设计合理的触发条件, 进一步消除 DPC 中非必要运算和控制动作. 围绕基于 ETDPC 的微电网能量管理策略, 本文进行了理论验证和控制器设计, 并通过数字仿真与硬件在环实验进行验证, 实验结果验证了本文所提出控制策略的有效性.

1 微电网系统

1.1 微电网系统结构

本文研究的直流微电网系统结构如图 1 所示, 其中包含光伏、电池、超级电容和负载等, 该微电网为一类典型的直流微电网, 在文献 [4, 8, 10-13, 17, 21] 中都得到运用并进行研究, 因此具有一定的代表性, 所提出的 ETDPC 方法作为微电网能量管理策略的一种参考具有一定程度的普适性.

图 1 中各变量含义如下: v_{pv} , v_{bat} , v_{sc} , i_{pv} , i_{bat} ,

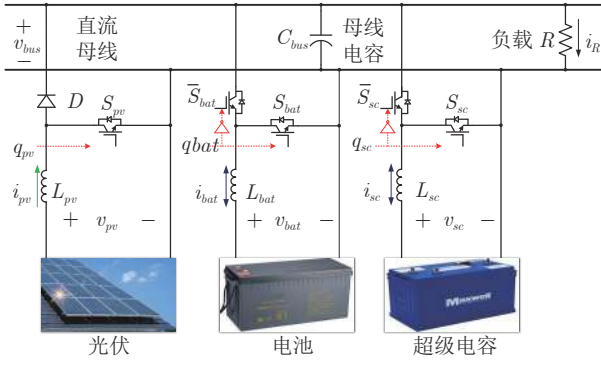


图1 微电网系统结构示意图

Fig.1 Diagram of the microgrid system

i_{sc} 分别代表光伏、电池和超级电容的输出电压和电流. 电感 L_{pv} , 开关 S_{pv} 和二极管 D 构成光伏变换器, 将光伏接入微电网. 电感 L_{bat} 和 L_{sc} (其电感值皆为 L)、两对互补开关 (S_{bat} , \bar{S}_{bat}) 和 (S_{sc} , \bar{S}_{sc}) 构成两个双向半桥变换器, 将电池-超级电容混合储能系统与直流母线相连. 各个变换器由相应的占空比信号 q_{pv} , q_{bat} 和 q_{sc} 控制. 直流母线上负载为 R , 母线电容为 C_{bus} (电容值为 C). v_{bus} 和 i_R 为母线电压和负载电流.

根据直流微电网系统结构, 可建立描述系统的状态方程为

$$C \frac{dv_{bus}(t)}{dt} = i_{bat}(t)(1 - q_{bat}(t)) + i_{sc}(t)(1 - q_{sc}(t)) + i_{pv}(t) - i_R(t) \quad (1)$$

$$L \frac{di_{bat}(t)}{dt} = v_{bat}(t) - v_{bus}(t)(1 - q_{bat}(t)) \quad (2)$$

$$L \frac{di_{sc}(t)}{dt} = v_{sc}(t) - v_{bus}(t)(1 - q_{sc}(t)) \quad (3)$$

此外, 电池和超级电容构成混合储能系统 (HESS), 实现近似理想储能设备的能量密度和功率密度^[4]. 因此可以定义混合储能系统所需要提供的电流 i_h , 其值由光伏和负载的差值决定, 表达式为

$$i_h(t) = i_R(t) - i_{pv}(t) \quad (4)$$

由式 (1) 和式 (4), 可得

$$C \frac{dv_{bus}(t)}{dt} = i_{bat}(t)(1 - q_{bat}(t)) + i_{sc}(t)(1 - q_{sc}(t)) - i_h(t) \quad (5)$$

1.2 微电网能量管理策略

本文所采取的 ETDPCC 的能量管理策略如图 2 所示.

首先, 对于光伏使用最大功率点追踪算法 (Maximum power point tracking, MPPT)^[11], 产生控制

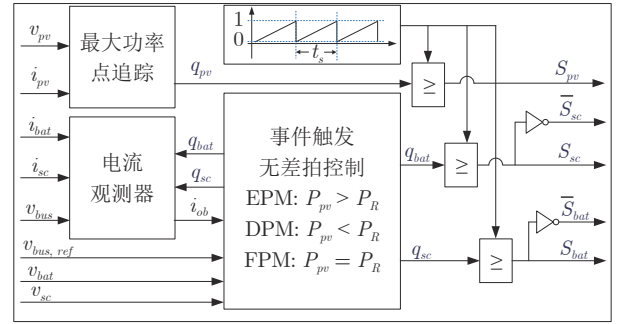


图2 基于事件触发无差拍控制的微电网能量管理策略框图

Fig.2 Diagram of ETDPCC-based energy management strategy for microgrid

光伏的占空比 q_{pv} , 实现其不同光照强度下最大功率输出.

其次, 由于实际的微电网中光伏、负载和电池-超级电容混合储能系统各设备安装距离较远, 从而导致信息交互成本高的问题. 因此, 本文采用电流观测器 (Current observer), 可以在不需要获得 i_{pv} 和 i_R 信息的前提下, 根据式 (5) 可知利用本地信息 (i_{bat} , i_{sc} , v_{bus} , q_{bat} , q_{sc}) 即可完成对 i_h 估测, 获得其观测值 i_{ob} , 其表达式为

$$i_{ob}(s) = (i_{bat}(s)(1 - q_{bat}(s)) + i_{sc}(s)(1 - q_{sc}(s)) - sCv_{bus}(s)) \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (6)$$

值得注意的是, 在式 (6) 中加入截止频率为 ω_c 的低通滤波器是为了消除来自式 (1) 中左侧微分项导致的高频噪声干扰.

最后, ETDPCC 利用前面步骤中获得的信息, 根据整个微电网的工作模式产生相应的占空比 q_{bat} 和 q_{sc} , 从而完成微电网能量管理. 其中微电网工作模式包括 3 种, 分别是功率过剩模式 (Excess power mode, EPM)、功率不足模式 (Deficit power mode, DPM) 和功率浮动模式 (Float power mode, FPM). 如图 2 所示, 3 种工作模式由光伏功率 P_{pv} 和负载功率 P_R 的大小关系确定 (即由 i_h 的正负符号确定). 作为本文的核心内容, ETDPCC 方法将在第 2 节详细介绍.

2 事件触发无差拍预测控制

2.1 系统模型

根据式 (1) ~ (3) 和式 (5), 可以得到微电网系统的模型为

$$\frac{dx_G(t)}{dt} = \mathbf{A}_m x_G(t) + \mathbf{B}_m z_G(t) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{x}_G(t)$ 为微电网系统所需控制的状态矩阵, 包含 $i_{bat}(t)$ 、 $i_{sc}(t)$ 和 $v_{bus}(t)$; $\mathbf{z}_G(t)$ 包含微电网系统其他状态变量 $v_{bat}(t)$ 、 $v_{sc}(t)$ 和 $i_{ob}(t)$; \mathbf{A}_m 和 \mathbf{B}_m 为系数矩阵. 因此, 各个矩阵为

$$\mathbf{x}_G(t) = [i_{bat}(t) \quad i_{sc}(t) \quad v_{bus}(t)]^T$$

$$\mathbf{z}_G(t) = [v_{bat}(t) \quad v_{sc}(t) \quad i_{ob}(t)]^T$$

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{q_{bat}-1}{L} \\ 0 & 0 & \frac{q_{sc}-1}{L} \\ \frac{1-q_{bat}}{C} & \frac{1-q_{sc}}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

2.2 事件触发控制

在传统无差拍预测控制中, 每个控制周期内都会更新控制占空比以达成控制目标. 然而实际当微电网系统运行在合适的目标状态范围内时, 无须频繁的复杂计算来更新占空比. 本文即通过引入事件触发控制, 适当消除冗余计算过程, 减少占空比更新次数, 同时保证微电网系统有效运行.

根据事件触发控制策略理论^[21], 定义系统的状态误差为 $\mathbf{e}_G(t)$, 其表达式为

$$\mathbf{e}_G(t) = \mathbf{x}_G(t_i) - \mathbf{x}_G(t), \quad t \in [t_i, t_{i+1}) \quad (8)$$

其中, t_i 和 t_{i+1} 分别为相邻两次事件触发时间点. 假设两次相邻事件触发的最短时间间隔预设为 t_{et} , 则 $(t_{i+1} - t_i)$ 为 t_{et} 的正整数倍, 而 t_{et} 则为控制器采样步长 t_s 的正整数倍. 一般来说, 控制器中运算执行次数与 t_{et} 的值成反比, 则控制效果与 t_{et} 的值亦成反比^[22]. 因此在本文中, 选取 t_{et} 为可行值的最小值, 即等于 t_s , 以保证控制性能.

由于在 $[t_i, t_{i+1})$ 内, 虽然 $\mathbf{e}_G(t)$ 持续变化, 但是其无法激活触发条件, 因此可以挂起无差拍预测控制的相关运算, 达到消除冗余计算和占空比更新的效果; 在 t_{i+1} 时刻, $\mathbf{e}_G(t_{i+1})$ 再次激活触发条件, 说明微电网已经偏离可行状态过多, 则需要运行无差拍预测控制, 更新占空比, 将微电网系统状态恢复到合适的运行范围内. 为实现合理的基于 ETDPCC 能量管理, 需要设计合适的触发条件.

定义微电网系统误差的模为 $\|\mathbf{e}_G(t)\|$, 基于文献 [21] 中的事件触发控制理论, 触发条件设计过程为

$$\begin{aligned} \frac{d\|\mathbf{e}_G(t)\|}{dt} &\leq \left\| \frac{d\mathbf{e}_G(t)}{dt} \right\| = \left\| \frac{d(\mathbf{x}_G(t) - \mathbf{x}_G(t_i))}{dt} \right\| = \\ &\left\| \frac{d\mathbf{x}_G(t)}{dt} \right\| = \|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t) + \mathbf{B}_m \mathbf{z}_G(t)\| \leq \\ &\|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t)\| + \|\mathbf{B}_m \mathbf{z}_G(t)\| \leq \\ &\|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t)\| + \|\mathbf{B}_m\| \|\mathbf{z}_G(t)\| = \\ &\|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t)\| + \|\mathbf{z}_G(t)\| \end{aligned} \quad (9)$$

将式 (8) 代入式 (9), 可以进一步推导如下:

$$\begin{aligned} \frac{d\|\mathbf{e}_G(t)\|}{dt} &\leq \|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t_i) - \mathbf{A}_m \mathbf{e}_G(t)\| + \|\mathbf{z}_G(t)\| \leq \\ &\|\mathbf{A}_m \mathbf{e}_G(t)\| + \|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t_i)\| + \|\mathbf{z}_G(t)\| \leq \\ &\|\mathbf{A}_m\| \|\mathbf{e}_G(t)\| + \|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t_i)\| + \|\mathbf{z}_G(t)\| \end{aligned} \quad (10)$$

为求解不等式 (10), 定义函数 $\psi(t)$ 为

$$\psi(t) = \|\mathbf{e}_G(t)\| + (\|\mathbf{A}_m\|)^{-1} (\|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t_i)\| + \|\mathbf{z}_G(t)\|) \quad (11)$$

不等式 (10) 可以重新表示为格朗沃尔不等式, 其形式为

$$\frac{d\psi(t)}{dt} \leq \|\mathbf{A}_m\| \psi(t), \quad t \in [t_i, t_{i+1}) \quad (12)$$

不等式 (12) 的解为

$$\begin{aligned} \psi(t) &\leq \psi(t_i) e^{\int_{t_i}^t \|\mathbf{A}_m\| dt} = \\ &(\|\mathbf{e}_G(t_i)\| + (\|\mathbf{A}_m\|)^{-1} (\|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t_i)\| + \\ &\|\mathbf{z}_G(t_i)\|)) e^{\|\mathbf{A}_m\| (t-t_i)} \end{aligned} \quad (13)$$

将式 (11)、 $\mathbf{e}_G(t_i) = 0$ 以及 $\mathbf{z}_G(t) = \mathbf{z}_G(t_i)$ 代入式 (13), 可以获得

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}_G(t)\| &\leq (\|\mathbf{A}_m\|)^{-1} (\|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t_i)\| + \\ &\|\mathbf{z}_G(t)\|) (e^{\|\mathbf{A}_m\| (t-t_i)} - 1) \end{aligned} \quad (14)$$

根据式 (14), 可以设计事件触发条件, 其具体形式为

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}_G(t)\| &> (\lambda \|\mathbf{A}_m\|)^{-1} (\|\mathbf{A}_m \mathbf{x}_G(t_i)\| + \\ &\|\mathbf{z}_G(t_i)\|) (e^{\|\mathbf{A}_m\| (t-t_i)} - 1) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, λ 为裕度系数, 用于调整式 (15) 中触发条件, 使之合理. 综上所述, 当 $\mathbf{e}_G(t)$ 的值变化到满足式 (15) 时, 即激活触发条件, 进而执行无差拍预测控制实现控制占空比更新, 将微电网状态恢复到合理范围内.

2.3 无差拍预测控制

图 1 中, 微电网系统的电池-超级电容混合储能系统使用双向半桥变换器, 其中电感 L_{bat} 和 L_{sc} ,

以及总线电容 C_{bus} 可视为能量缓存器, 因此可以得到混合储能系统电流 i_h 与母线电压 v_{bus} 的关系满足^[20]

$$Li_h^2(t+t_s) - Li_h^2(t) = Cv_{bus}^2(t+t_s) - Cv_{bus}^2(t) \quad (16)$$

其中, t_s 为无差拍预测控制的控制周期 (采样时间步长). 在无差拍预测控制中, 需要在在一个控制周期内产生最优控制信号消除系统误差. 因此式 (16) 中 $i_h(t+t_s)$ 和 $v_{bus}(t+t_s)$ 可以替换为相应的微电网电流和电压控制目标 $i_{h,ref}$ 和 $v_{bus,ref}$, 从而将式 (16) 改写为式 (17), 即

$$Li_{h,ref}^2 - Li_h^2(t) = Cv_{bus,ref}^2 - Cv_{bus}^2(t) \quad (17)$$

由式 (17) 可得 $i_{h,ref}$ 的表达式为

$$i_{h,ref} = \left(\frac{C}{L} (v_{bus,ref}^2 - v_{bus}^2(t)) + i_h^2(t) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

根据混合储能系统中不同储能设备的特性, 可以利用截止频率为 ω_r 的低通滤波器将 $i_{h,ref}$ 分解为电池和超级电容的电流控制目标 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$, 其表达式为

$$i_{bat,ref} = \frac{\omega_r}{s + \omega_r} \frac{v_{bus}}{v_{bat}} i_{h,ref} \quad (19)$$

$$i_{sc,ref} = \left(1 - \frac{\omega_r}{s + \omega_r} \right) \frac{v_{bus}}{v_{sc}} i_{h,ref} \quad (20)$$

其中, ω_r 由电池的反应时间决定.

类似于式 (17), 可以将 $i_{bat}(t+t_s)$ 和 $i_{sc}(t+t_s)$ 替换为相应的微电网电流和电压控制目标 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$, 式 (2) 和式 (3) 可改写为

$$L_{bat} \frac{i_{bat,ref} - i_{bat}(t)}{t_s} = v_{bat}(t) - v_{bus}(t) (1 - q_{bat}) \quad (21)$$

$$L_{sc} \frac{i_{sc,ref} - i_{sc}(t)}{t_s} = v_{sc}(t) - v_{bus}(t) (1 - q_{sc}) \quad (22)$$

进而, 求解占空比 q_{bat} 和 q_{sc} 的表达式为

$$q_{bat} = \frac{t_s (v_{bus}(t) - v_{bat}(t)) - L (i_{bat,ref} - i_{bat}(t))}{v_{bus}(t) t_s} \quad (23)$$

$$q_{sc} = \frac{t_s (v_{bus}(t) - v_{sc}(t)) - L (i_{sc,ref} - i_{sc}(t))}{v_{bus}(t) t_s} \quad (24)$$

式 (23) 和式 (24) 表明通过无差拍预测控制方法可以直接获得最优控制占空比, 实现微电网系统中混合储能系统的控制, 平衡光伏与负载间的功率失配, 稳定母线电压.

2.4 事件触发无差拍预测控制器

根据第 2.1 ~ 2.3 节的讨论, 可以具体设计图 2 中 ETDPC 控制器, 其控制框图如图 3 所示. ETDPC 控制器包括微电网状态测量与观测模块、事件触发控制模块和无差拍控制模块, 其中式 (6) 实现测量与观测模块中 i_h 的估测, 即获得 i_{ob} 的值; 式 (15) 构成事件触发控制模块中的事件触发条件; 无差拍控制模块则主要由式 (18)、(23) 和 (24) 构成, 分别实现电流参考值和最优占空比的运算. 特别地, 如果微电网结构不同于图 1, 则需要根据微电网结构更新状态空间模型, 重新推导式 (15)、(18)、(23) 和 (24), 即可实现 ETDPC 控制.

图 3 的 ETDPC 控制器的执行步骤描述如下: 首先, 进行微电网系统的状态测量与观测, 获得式 (7) 中向量 $x_G(t)$ 和 $z_G(t)$. 实时获得的 $x_G(t)$ 和 $z_G(t)$ 送入触发条件检测模块, 并决定微电网的运行模式 EPM、DPM 和 FPM. 其次, 利用所获得的信息, 验证不等式触发条件是否成立: 若系统状态不满足触发条件, 即触发条件未被激活, 则发出触发信号为假值, 将挂起无差拍预测控制模块, 占空比 q_{bat} 和 q_{sc} 保持为原有值; 若系统状态满足

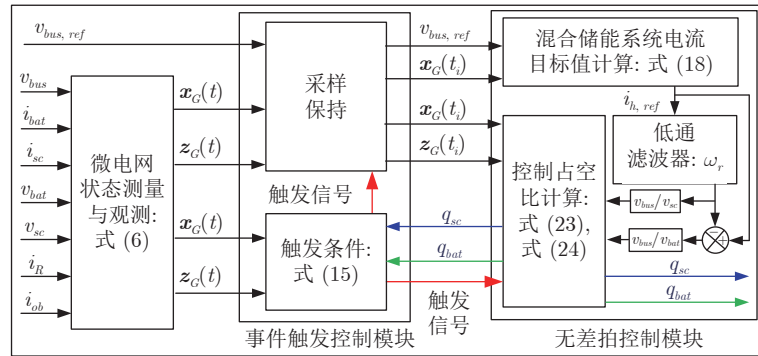


图 3 事件触发无差拍控制框图

Fig. 3 Diagram of ETDPC method

触发条件,则发出触发信号为真值,将 $\boldsymbol{x}_G(t_i)$ 和 $\boldsymbol{z}_G(t_i)$ 更新为 $\boldsymbol{x}_G(t)$ 和 $\boldsymbol{z}_G(t)$,输入无差拍预测控制模块,结合母线电压目标值 $v_{bus,ref}$,获得混合储能系统电流目标值 $i_{h,ref}$,再根据式(19)和式(20)得到电池和超级电容电流目标值 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$.最后,将 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$ 代入式(23)和式(24),得到最优占空比 q_{bat} 和 q_{sc} .

3 数字仿真研究

为验证基于ETDPC的直流微电网能量管理策略,本文在MATLAB/Simulink中建立图1的微电网系统模型进行数字仿真.该微电网系统模型的参数列举在表1中.其中无差拍预测控制的控制周期 t_s 和事件触发控制周期 t_{et} 均设置为 $100\ \mu\text{s}$,从而保证每次执行事件触发条件检测后再决定是否执行无差拍预测控制.因此 t_{i+1} 和 t_i 的差值为 t_{et} 的正整数倍.此外,本节数字仿真总时间为 $60\ \text{s}$.

表1 仿真参数表

Table 1 Parameters for the simulation studies

类别	参数名称	数值	
双向半桥变换器	v_{bus}	300 V	
	C	4 700 μF	
	$L(L_{bat}, L_{sc})$	47 mH	
混合储能系统	电池	v_{bat}	200 V
	容量	Capacity (容量)	65 Ah
超级电容	v_{sc}	200 V	
	容值	Capacitance (容值)	50 F
光伏电池单元	v_{pv} (开路电压)	30.2 V	
	i_{pv} (短路电流)	5.0 A	
控制方法时间步长	t_s	100 μs	
	t_{et}	100 μs	

3.1 跳变仿真波形

图4和图5分别展示了微电网系统在ETDPC下的光伏以及负载跳变时的仿真波形,包括母线电压 v_{bus} 、负载电流 i_R 和光伏电流 i_{pv} ,以及各储能设备电流 i_{bat} 、 i_{sc} 和对应的参考电流 $i_{bat,ref}$ 、 $i_{sc,ref}$.由图4可以观察到,负载电流 i_R 分别有3次从10.0 A到13.8 A的阶跃上升和3次反向的阶跃下降;同时光伏电流 i_{pv} 在MPPT算法控制下随着光照强度变化,在[3.5 A, 14.8 A]区间内发生4次阶跃跳变.

混合储能系统快速应对上述负载和光伏的跳变,并根据式(19)和式(20)合理分配给电池和超级电容,并在触发条件被合理激活的情况下产生最优占空比 q_{bat} 和 q_{sc} .从图5可以看出, i_{bat} 和 i_{sc} 紧

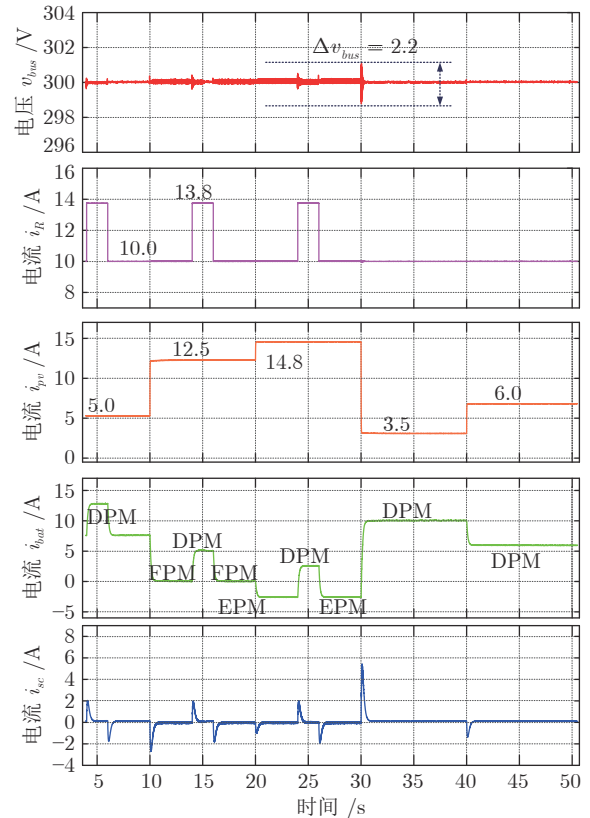


图4 光伏和负载跳变时微电网仿真波形,包括 v_{bus} 、 i_R 、 i_{pv} 、 i_{bat} 和 i_{sc}

Fig.4 The simulation results of microgrid under step changes of PV and load, including the waveforms of v_{bus} , i_R , i_{pv} , i_{bat} , and i_{sc}

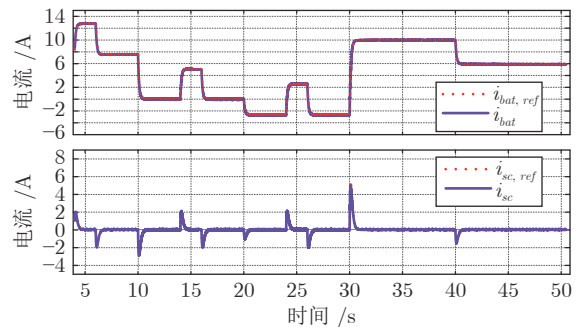


图5 光伏和负载跳变时电池与超级电容电流 i_{bat} 和 i_{sc} 仿真波形及其对应参考值波形 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$

Fig.5 The simulation results of i_{bat} and i_{sc} , and the corresponding reference $i_{bat,ref}$ and $i_{sc,ref}$ respectively under step changes of PV and load

密跟随对应的参考电流 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$,即电池响应平均功率需求,超级电容响应瞬时功率需求.

图4和图5的结果表明,在图2和图3所示的基于ETDPC的能量管理策略的控制下,微电网可以在DPM、FPM和EPM三种模式下无缝切换,

平衡光伏和负载的功率失配. 因此直流母线的电压被稳定在目标值 $v_{bus,ref} = 300$ V 附近, 并且纹波电压小于 2.2 V, 为目标值的 0.73%.

类似地, 图 6 和图 7 分别展示了微电网系统在 ETDPDC 下的母线电压目标值跳变时的仿真波形. 由图 6 可以观察到, 母线电压目标值 $v_{bus,ref}$ 由 300 V 跳变为 350 V, 相应的负载电流由 10.00 A 上升到 11.67 A, 而且混合储能系统快速应对上述跳变, 进行电池和超级电容功率的合理分配, 并在

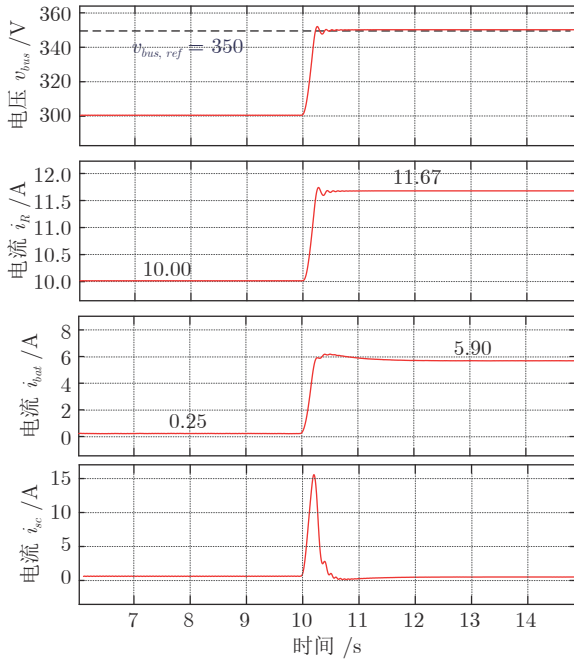


图 6 $v_{bus,ref}$ 跳变时微电网仿真结果, 包括 v_{bus} , i_R , i_{pv} , i_{bat} 和 i_{sc} 波形

Fig.6 The simulation results of microgrid under step changes of $v_{bus,ref}$, including the waveforms of v_{bus} , i_R , i_{pv} , i_{bat} , and i_{sc}

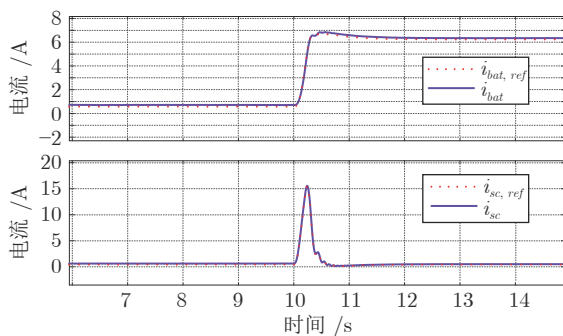


图 7 $v_{bus,ref}$ 跳变时 i_{bat} 和 i_{sc} 仿真结果及其对应参考值 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$

Fig.7 The simulation results of i_{bat} and i_{sc} , and the corresponding reference $i_{bat,ref}$ and $i_{sc,ref}$ under step changes of $v_{bus,ref}$

触发条件被合理激活的情况下产生最优占空比 q_{bat} 和 q_{sc} , 其中 i_{bat} 从 0.25 A 上升到 5.90 A. 从图 7 可以看出, i_{bat} 和 i_{sc} 紧密跟随对应的参考电流 $i_{bat,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$, 即电池响应平均功率需求, 超级电容响应瞬时功率需求.

3.2 观测器与控制信号

式 (6) 中设计的电流观测器波形展示在图 8 中. 可以看到观测器所得的电流 i_{ob} 的波形与实际的混合储能系统所提供的电流 i_h 的波形相符. 因此, 在实际的能量管理策略中, 可以使用 i_{ob} 代替 i_h , 无需获得光伏电流 i_{pv} 信息, 从而克服由于光伏安装距离较远导致其信息难以获得的困难.

图 9 对比了传统无差拍预测控制和本文提出的 ETDPDC 所产生的控制信号. 图 9(a) 和图 9(b) 同时选取了 [7.105 s, 7.145 s] 时间窗口的控制信号波形, 可以看出 0.04 s 内传统无差拍预测控制信号比 ETDPDC 信号更为密集, 表明引入事件触发以后, 在保证微电网系统的有效运行的前提下, 可以显著

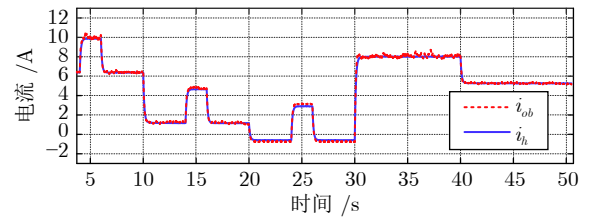
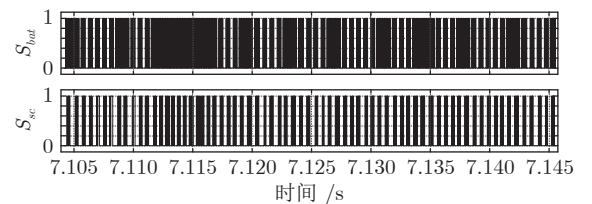
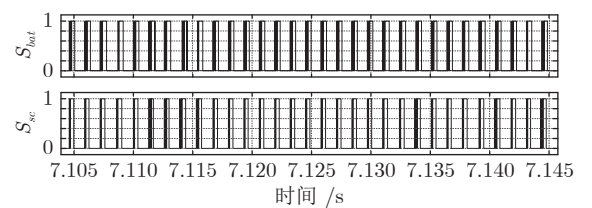


图 8 电流 i_h 以及观测所得电流 i_{ob} 对比

Fig.8 The comparison between the current i_h and the observed current i_{ob}



(a) Waveform of traditional deadbeat control signal



(b) 事件触发无差拍控制信号波形
(b) Waveform of event-triggered deadbeat control signal

图 9 传统无差拍与事件触发无差拍控制信号对比
Fig.9 Comparison of traditional deadbeat and event-triggered deadbeat control signals

减少非必要的控制动作, 消除冗余计算.

3.3 运算执行次数

为进一步研究事件触发策略减小 ETDPC 方法运算负担的能力, 表 2 将传统 DPC 方法和本文提出的 ETDPC 方法的运算执行次数进行对比. 由表 2 可知, 由于引入事件触发策略, 可以显著减少运算执行次数: ETDPC 的平均执行次数为 49.37 万次/百秒; DPC 的平均执行次数为 100 万次/百秒. 两种控制方法的母线电压纹波分别为 2.2 V 和 1.8 V, 因此虽然电压纹波增加了 0.4 V, 即相对于目标电压值增加了 0.13%, 但是运算执行次数反而降低了 50.63%.

表 2 运算执行次数统计表
Table 2 Statistics table of the number of operation times

时间 (s)	执行次数 (万次)	
	DPC	ETDPC
100	100	48.2
200	200	98.1
300	300	148.2
400	400	197.8
500	500	247.2
600	600	297.4
平均执行次数 (万次/百秒)	100	49.37
纹波 (V)	1.8	2.2

4 硬件在环实验研究

4.1 硬件在环实验设计

由于具有验证快速和置信度高的特点, 近年来硬件在环 (Hardware-in-loop, HIL) 验证方法广泛应用于包含微电网在内的各类复杂系统的验证中^[8]. 因此, 本文采用由 OPAL-RT 实时仿真器 OP5600 和 MicroLabBox 控制器构成的 HIL 平台对基于 ETDPC 的微电网能量管理策略进行实验验证. 如图 10 所示, 在 HIL 平台中: 仿真器 OP5600 将实时运行微电网系统, 并产生系统状态信号; MicroLabBox 控制器将执行基于 ETDPC 的微电网能量管理策略, 从而产生开关控制信号; 实时仿真器和控制器通过数模和模数交互接口通讯, 获得高度接近真实硬件的运行结果; 此外, 系统实时状态可以通过示波器采集, 实现观测与记录.

为使硬件在环实验更加符合实际情况, 本文采用典型日常光照强度曲线^[11], 该曲线展示在图 11 中. 可以看到, 光照强度在 1 500 W/m² 和 2 200 W/m²

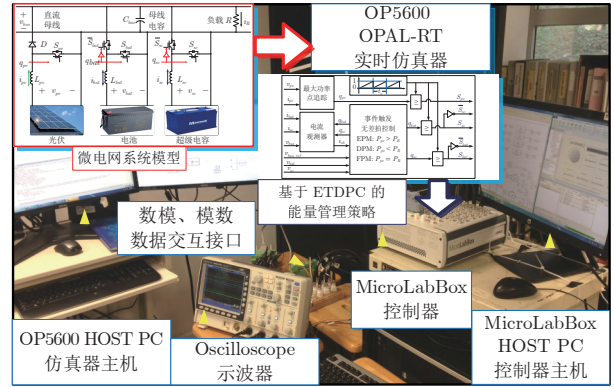


图 10 微电网硬件在环测试平台

Fig. 10 The HIL test platform for microgrid

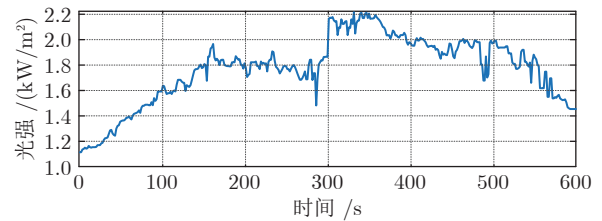


图 11 硬件在环实验采用光照强度曲线

Fig. 11 The irradiance curve adopted in HIL experiment

之间波动; 此外, 考虑到硬件在环平台数据存储能力受限, 将 12 h 的光照强度曲线降采样到 600 s 内, 并且在 300 s 处, 设置了一次光照强度的阶跃变化, 验证所提出基于 ETDPC 的能量管理策略在极限情况下的性能.

4.2 硬件在环实验结果

硬件在环实验结果展示在图 12 ~ 15 中, 分别包括基于 ETDPC 和 DPC 的能量管理下微电网的电压、电流以及功率波形.

图 12 和图 13 对比了在两种控制方法下微电网波形, 包括母线电压 v_{bus} 、电流 i_R 、光伏电流 i_{pv} 以及电池-超级电容混合储能系统电流 i_{bat} 、 i_{sc} , 并且选取了示波器中间两次负载阶跃跳变进行结果放大, 深入观察分析. 可以看出, 在图 11 中实际光照强度条件下, 两种控制方法效果接近: 微电网系统可以在 EPM 和 DPM 两种模式平滑切换, 电池-超级电容混合储能系统根据各储能设备性能响应光伏和负载的连续变化, 其中负载电流变化范围为 [10.0 A, 13.7 A]; 母线电压 v_{bus} 稳定在目标电压 300 V 附近, 其中 ETDPC 的纹波电压为 2.0 V, 接近于传统方法下的纹波电压 1.5 V.

图 14 和图 15 对比了微电网功率波形, 包括光伏功率 P_{pv} 、电池功率 P_{bat} 、超级电容功率 P_{sc} 和负

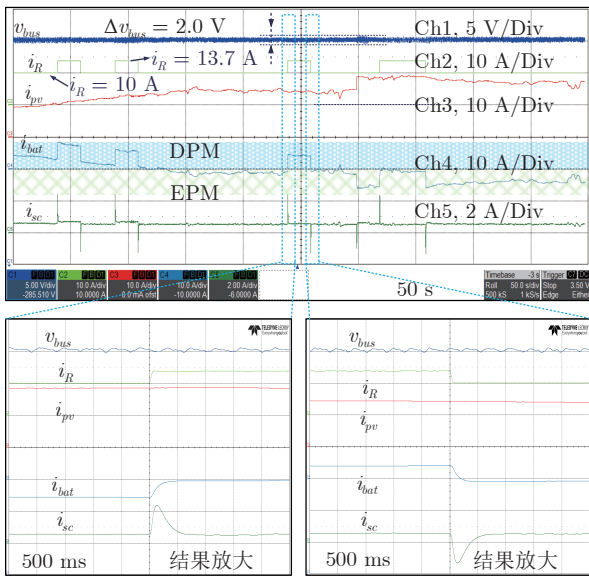


图 12 基于 ETDP 硬件在环波形:

v_{bus} , i_R , i_{pv} , i_{bat} 和 i_{sc}

Fig. 12 The HIL waveforms of ETDP method:

v_{bus} , i_R , i_{pv} , i_{bat} , and i_{sc}

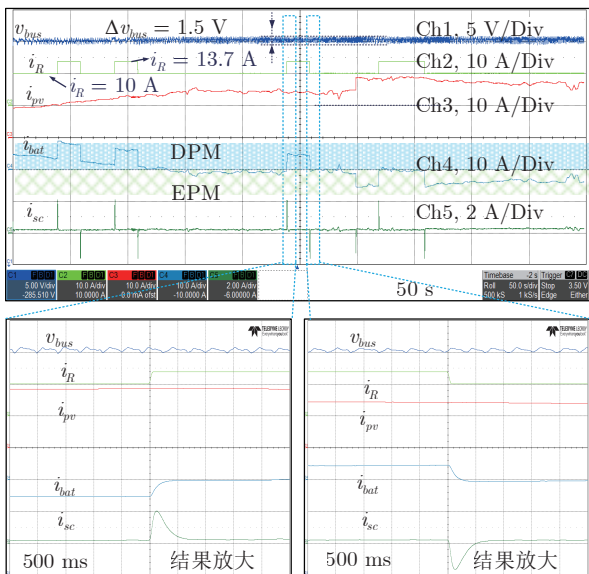


图 13 基于 DPC 硬件在环波形:

v_{bus} , i_R , i_{pv} , i_{bat} 和 i_{sc}

Fig. 13 The HIL waveforms of DPC method:

v_{bus} , i_R , i_{pv} , i_{bat} , and i_{sc}

载功率 P_R , 同时选取了示波器中间 50 s 时间段内两次负载功率阶跃跳变进行结果放大, 深入观察分析. 从图 14 和图 15 的对比可以分析出, 基于 ET-DPC 的能量管理策略, 针对实际的光照强度连续变化和负载阶跃变化的复杂工况 (其中光伏功率变化

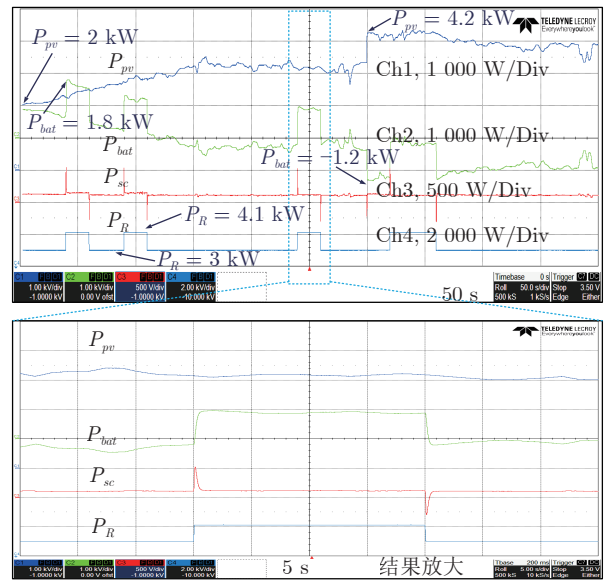


图 14 基于 ETDP 硬件在环功率波形:

P_{pv} , P_{bat} , P_{sc} 和 P_R

Fig. 14 The HIL power waveforms of ETDP method:

P_{pv} , P_{bat} , P_{sc} , and P_R

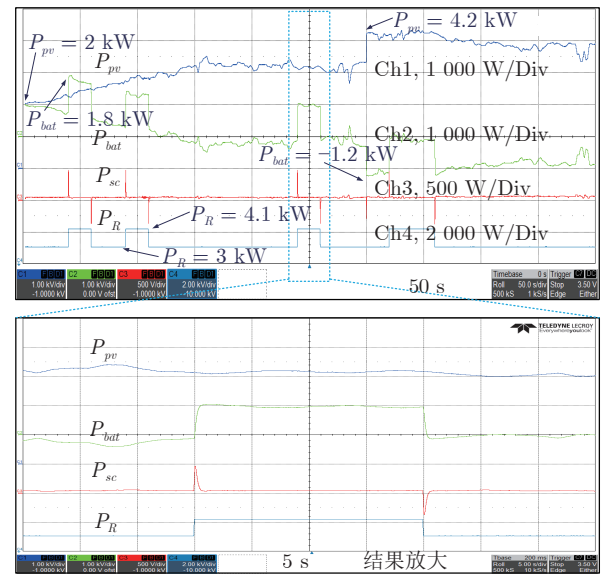


图 15 基于 DPC 硬件在环功率波形:

P_{pv} , P_{bat} , P_{sc} 和 P_R

Fig. 15 The HIL power waveforms of DPC method:

P_{pv} , P_{bat} , P_{sc} , and P_R

范围为 [2.0 kW, 4.2 kW], 负载功率范围为 [3.0 kW, 4.1 kW]), 可以进行有效的微电网能量管理, 利用电池响应平均功率需求 (电池的功率变化范围为 [-1.2 kW, 1.8 kW], 功率为负表示电池充电吸收过剩光伏功率), 超级电容响应瞬时功率需求, 从而完成对光伏功率和负载功率的平衡, 稳定微电网母线

电压. 因此本文提出的基于 ETDPC 的能量管理策略, 相较于传统方法, 在保证类似微电网运行性能的前提下, 显著减少了非必要无差拍预测控制运算和相应的控制动作.

表 3 将硬件在环实验 (示波器中进行了 500 s 的硬件在环实验) 运算执行次数进行对比. 由表 3 可知, 引入事件触发策略的 ETDPC 方法的硬件在环实验的平均运算执行次数为 52.6 万次/百秒, 较传统 DPC 方法的平均运算执行次数 100 万次/百秒显著减小. 两种控制方法的母线电压纹波分别为 2.0 V 和 1.5 V, 因此虽然电压纹波增加 0.5 V, 即相对于目标电压值增加了 0.17%, 但是运算执行次数降低了 47.4%.

表 3 硬件在环运算执行次数统计表
Table 3 Operation times of the HIL experiments

时间 (s)	执行次数 (万次)	
	DPC	ETDPC
100	100	57.9
200	200	108.1
300	300	158.2
400	400	207.6
500	500	257.2
平均执行次数 (万次/百秒)	100	52.6
纹波 (V)	1.5	2.0

5 结束语

本文针对微电网系统提出基于 ETDPC 的能量管理策略: 通过结合事件触发控制和无差拍预测控制, 使得能量管理策略能够快速响应微电网内的光伏和负载各种变化, 实现功率平衡, 保证母线电压稳定, 同时避免了非必要无差拍预测控制动作, 从而减少了运算资源需求和开关损耗.

针对所提出的基于 ETDPC 的能量管理策略, 本文进行了详细的理论推导和具体控制器设计, 以及微电网系统的数字建模与仿真, 并且通过结合实际的光照曲线进行硬件在环实验验证和对比. 实验结果均表明, 在保证微电网系统有效运行的前提下, ETDPC 克服传统无差拍预测控制方法中存在大量冗余运算与控制动作的缺陷, 为微电网能量管理提供了一种参考. 后续拟开展在微电网并网和多微电网互联两种情况下基于 ETDPC 的能量管理策略研究工作.

References

1 Mei Sheng-Wei, Zhu Jian-Quan. Mathematical and control sci-

entific issues of smart grid and its prospects. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(2): 119–131

(梅生伟, 朱建全. 智能电网中的若干数学与控制科学问题及其展望. *自动化学报*, 2013, **39**(2): 119–131)

2 Dragičević T, Lu X N, Vasquez J C, Guerrero J M. DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, **31**(5): 3528–3549

3 Wang Cheng, Liu De-Rong, Wei Qing-Lai, Zhao Dong-Bin, Xia Zhen-Chao. Iterative adaptive dynamic programming approach to power optimal control for smart grid with energy storage devices. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 1984–1990

(王澄, 刘德荣, 魏庆来, 赵冬斌, 夏振超. 有储能设备的智能电网电能迭代自适应动态规划最优控制. *自动化学报*, 2014, **40**(9): 1984–1990)

4 Xu Q W, Hu X L, Wang P, Xiao J F, Tu P F, Wen C Y, et al. A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(7): 5930–5941

5 Lu Zi-Bao, Zhong Shang-Peng, Guo Ge. Design of droop controller for DC microgrid based on distributed strategy. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(10): 2472–2483

(卢自宝, 钟尚鹏, 郭戈. 基于分布式策略的直流微电网下垂控制器设计. *自动化学报*, 2021, **47**(10): 2472–2483)

6 Liu Jian-Gang, Yang Sheng-Jie. Distributed cooperative control of DC micro-grid systems with capacitive loads. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(6): 1283–1290

(刘建刚, 杨胜杰. 具有容性负载的直流微电网系统分布式协同控制. *自动化学报*, 2020, **46**(6): 1283–1290)

7 Baros S, Ilić M D. A consensus approach to real-time distributed control of energy storage systems in wind farms. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, **10**(1): 613–625

8 Wang B F, Wang Y, Xu Y, Zhang X, Gooi H B, Ukil A, et al. Consensus-based control of hybrid energy storage system with a cascaded multiport converter in DC microgrids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, **11**(4): 2356–2366

9 Teleke S, Baran M E, Bhattacharya S, Huang A Q. Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, **1**(3): 117–124

10 Tummuru N R, Mishra M K, Srinivas S. Dynamic energy management of renewable grid integrated hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(12): 7728–7737

11 Manandhar U, Ukil A, Gooi H B, Tummuru N R, Kollimalla K, Wang B F, et al. Energy management and control for grid connected hybrid energy storage system under different operating modes. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, **10**(2): 1626–1636

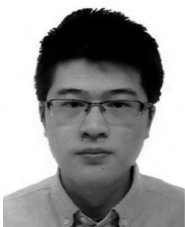
12 Xiao J F, Wang P, Setyawan L. Hierarchical control of hybrid energy storage system in DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(8): 4915–4924

13 Xiao J F, Wang P, Setyawan L. Multilevel energy management system for hybridization of energy storages in DC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, **7**(2): 847–856

14 Abeywardana D B W, Hredzak B, Agelidis V G. A fixed fre-

quency sliding mode controller for a boost-inverter-based battery supercapacitor hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, **32**(1): 668–680

- 15 Wang B, Xu J, Wai R J, Cao B G. Adaptive sliding-mode with hysteresis control strategy for simple multimode hybrid energy storage system in electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(2): 1404–1414
- 16 Kouro S, Perez M A, Rodriguez J, Llor A M, Young H A. Model predictive control: MPC's role in the evolution of power electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2015, **9**(4): 8–21
- 17 Zhang X N, Wang B F, Manandhar U, Gooi H B, Foo G. A model predictive current controlled bidirectional three-level DC/DC converter for hybrid energy storage system in DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, **34**(5): 4025–4030
- 18 Zhang Yan, Zhang Tao, Wang Rui, Liu Ya-Jie, Guo Bo. A model predictive control based distributed coordination of multi-microgrids in energy internet. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(8): 1443–1456
(张彦, 张涛, 王锐, 刘亚杰, 郭波. 基于模型预测控制的含多微电网的能源互联网分布式协同优化. *自动化学报*, 2017, **43**(8): 1443–1456)
- 19 Shan Y H, Hu J F, Chan K W, Fu Q, Guerrero J M. Model predictive control of bidirectional DC-DC converters and AC/DC interlinking converters—A new control method for PV-wind-battery microgrids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, **10**(4): 1823–1833
- 20 Wang B F, Kanamarlapudi V R K, Xian L, Peng X Y, Tan K T, So P L. Model predictive voltage control for single-inductor multiple-output DC-DC converter with reduced cross regulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(7): 4187–4197
- 21 Wang B F, Manandhar U, Zhang X N, Gooi H B, Ukil A. Dead-beat control for hybrid energy storage systems in DC microgrids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, **10**(4): 1867–1877
- 22 Wang B F, Huang J J, Wen C Y, Rodriguez J, Garcia C, Gooi H B, et al. Event-triggered model predictive control for power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, **68**(1): 715–720



王本斐 中山大学智能工程学院副教授. 2017 年获得新加坡南洋理工大学博士学位. 主要研究方向为电力电子先进控制方法, 微电网和电动汽车.

E-mail: wangbf8@mail.sysu.edu.cn

(WANG Ben-Fei Associate professor at the School of Intelligent

Systems Engineering, Sun Yat-sen University. He received his Ph.D. degree from Nanyang Technological University, Singapore in 2017. His research interest covers advanced control for power electronics, microgrids and electric vehicles.)



张荣辉 中山大学智能工程学院副教授. 2009 年获得中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位. 主要研究方向为智能车辆与辅助驾驶, 新能源汽车. 本文通信作者.

E-mail: zhangrh25@mail.sysu.edu.cn

(ZHANG Rong-Hui Associate pro-

fessor at the School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University. He received his Ph.D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2009. His research interest covers intelligent vehicle and assisted driving, and new energy vehicles. Corresponding author of this paper.)



冯国栋 中山大学智能工程学院副教授. 2015 年获得中山大学博士学位. 主要研究方向为新能源汽车和电动动力系统控制.

E-mail: fenggd6@mail.sysu.edu.cn

(FENG Guo-Dong Associate professor at the School of Intelligent

Systems Engineering, Sun Yat-sen University. He received his Ph.D. degree from Sun Yat-sen University in 2015. His research interest covers new energy vehicles and electric power train control.)



MANANDHAR Ujjal 新加坡南洋理工大学博士后. 2019 年获得新加坡南洋理工大学博士学位. 主要研究方向为微电网, 储能系统, 硬件在环平台.

E-mail: ujjal001@e.ntu.edu.sg

(MANANDHAR Ujjal Postdoctor

at Nanyang Technological University, Singapore. He received his Ph.D. degree from Nanyang Technological University, Singapore in 2019. His research interest covers microgrids, energy storage system, and hardware-in-loop platform.)



郭戈 东北大学教授. 1998 年获得东北大学博士学位. 主要研究方向为智能交通系统, 运动目标检测跟踪网络. E-mail: geguo@yeah.net

(GUO Ge Professor at Northeast-

ern University. He received his Ph.D. degree from Northeastern University in 1998. His research interest covers intelligent transportation system, and moving target detection and tracking with network.)