

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191590

一种混合储能变换器的模型预测整体控制方法

吴鸣¹, 李振伟², 孙丽敬¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 新能源发电渗透率逐渐提高, 由新能源本身固有特性向电网引入的功率扰动不容忽视, 且在高比例接入情况下对于新能源发电参与电网调节的需求越来越大, 这对其系统功率响应性能提出了更高的要求。由蓄电池和超级电容组成的混合储能由于具有互补的能量特性, 应用于新能源发电系统中可以帮助提升其整体的能量处理能力。为了充分发挥储能介质的功率特性, 针对光伏发电系统中的应用, 提出了一种应用于蓄电池-超级电容混合储能变换器的模型预测整体控制方法。根据变换器主电路的数学模型, 结合混合储能的控制目标, 设计了嵌入功率滤波器的模型预测整体控制策略。仿真结果表明提出的模型预测整体控制方法具有优越的功率响应特性与参数鲁棒性。
关键词: 新能源发电; 功率响应; 蓄电池-超级电容; 混合储能; 模型预测整体控制方法; 参数鲁棒性

A model predictive overall control method for a hybrid energy storage converter

WU Ming¹, LI Zhenwei², SUN Lijing¹

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 2. College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: As the penetration rate of renewable energy generation increases, the power disturbance it introduces into the grid for its inherent characteristics cannot be ignored. In the case of high proportion access, the demand for renewable energy generation to participate in grid regulation is increasing. This puts higher demands on its power response performance. A hybrid energy storage consisting of battery and super capacitor, because of their complementary energy characteristics, can help improve the overall energy handling capacity of the renewable energy generation system. In order to take full advantage of energy storage media according to their power characteristics, a model predictive overall control method for the hybrid battery-super capacitor hybrid energy storage converter is proposed for application in a photovoltaic power generation system. Given a mathematical model of the bidirectional DC/DC converter, combined with the control objective of the hybrid energy storage, a Model Prediction Overall Control (MPC) strategy with embedded power filter is designed. The simulation results show that the proposed model predictive overall control method has superior power response characteristics and parameter robustness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877201).

Key words: renewable energy generation; power response; battery-super capacitor; hybrid energy storage; model predictive overall control method; parameter robustness

0 引言

在国家政策支持与研究者的不断努力下, 新能源发电在多个领域得到大量应用, 成为缓解能源危机, 减少环境污染的有效途径。由于新能源本身固有分散性、间歇性、易受环境因素影响等特点, 多通过电力电子换流器转换后接入电网。随着渗透率

的提高, 新能源发电参与电网调节的需求越来越大, 对其系统中电力电子换流器的性能提出了更高的要求。以光伏发电为例, 因受光照、温度等的影响, 其产生的功率波动通过电力电子换流器注入电网, 对电网造成一定的影响, 且无法保证在电网调节中可靠发力。文献[1-2]解决该问题的一个有效方法是加入储能, 以缓冲光伏与电网间的能量交换。目前, 蓄电池和超级电容由于具有互补的能量、功率特性, 其组合形成的混合储能能在电动汽车、新能

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877201)

源发电等领域得到了广泛的应用^[3-7]。蓄电池能量密度高, 负责提供长时间的能量缓冲; 超级电容功率密度高, 适用于实现快速的功率响应。采用蓄电池和超级电容作为混合储能的光伏发电系统如图 1 所示。二者互补, 在双向直流变换器的控制下, 根据系统需求提供能量缓冲与功率响应。在很多情况下, 还需提供直流母线支撑作用。例如, 为了使新能源

发电装置参与电网调节, 可以对并网逆变器应用虚拟同步发电机(VSG)控制方法, 使其具备同步发电机特性^[8-11]。此时, 系统直流母线电压需由储能双向变换器支撑, 且要求其能够配合光伏部分对电网功率波动进行快速响应。因此, 储能双向变换器的性能决定了储能介质能否有效补偿光伏能量, 提升发电系统的整体性能及参与电网调节的可靠性。

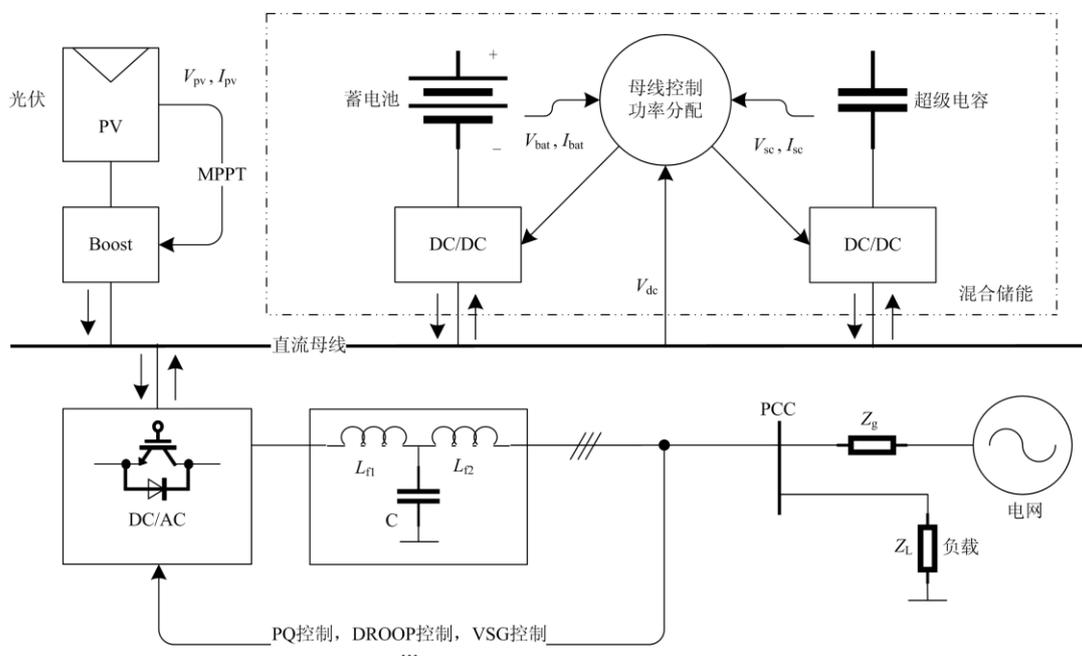


图 1 光伏储能发电系统

Fig. 1 Photovoltaic generation system with energy storage

在储能双向变换器的控制方面, 典型的基于低通滤波功率分频的双环控制^[12-14]方法如图 2 所示。电压外环负责稳定直流母线电压, 生成内环电流指令, 经过低通滤波器分频后得到蓄电池和超级电容的电流参考信号, 二者分别经过比例积分微分(PID)调节器实现对蓄电池和超级电容的功率控制。在该方法中, 电流指令反映功率需求, 蓄电池提供低频率功率缓冲, 超级电容进行高频功率响应, 实现对光伏能量的补偿。文献[15]利用双有源桥变换器(DAB)构成了由蓄电池和超级电容组成的复合储能系统, 设计了基于级联双环控制的能量管理策略, 实现了功率需求的自动分配。文献[16]针对蓄电池-超级电容级联储能系统结构, 提出了基于电压下垂的混合储能控制方法。由电压下垂控制稳定直流母线电压, 同时生成内环电流指令, 实现对蓄电池电流的平滑控制。这些控制方法实现了混合储能系统的能量分配, 但均基于 PID 调节器, 其固有缺点导致储能介质的性能无法得到充分利用。采用级联双环反馈控

制使得控制结构复杂化, 系统动态响应速度较慢。PID 参数调节耗时长^[17], 且基于特定稳态工作点设计的参数值无法在工作点变化后保持良好的控制特性。对于蓄电池和超级电容组成的混合储能来说, 需根据发电系统需求进行能量转换, 其运行功率、端电压等均存在较大的变化, 使用基于 PID 的控制器难以保证在多种运行条件下的响应性能。

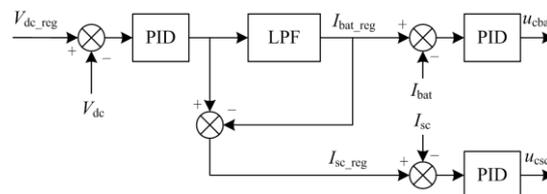


图 2 基于低通滤波器的双环控制方法

Fig. 2 Double loop control method based on low pass filter

近年来, 借助数字计算技术的飞速发展, 模型预测控制(MPC)作为一种离散控制方法得到了广泛的关注。MPC 方法利用有限的开关状态与灵活的目

标函数实现对被控对象的控制,结构简单,易于实现,在电机控制、微网变换器等领域得到了大量的应用^[18-22]。文献[23]在传统双环控制方法的基础上,利用 MPC 方法实现电流内环,提高了系统的动态响应速度与稳定性。文献[24]为了提升直流微网的暂态稳定性,避免新能源本身随机波动、负荷波动、非计划孤岛等暂态扰动引起系统直流母线的大幅波动,利用 MPC 控制对混合储能电压下垂控制方法进行了改进。首先通过在电压外环采用自适应下垂系数向储能系统引入惯性,提高储能对扰动的响应速率。同时为了配合系统进行快速惯性调节,避免控制延时,在电流内环采用 MPC 方法实现快速跟踪。以上研究利用 MPC 方法提升了蓄电池-超级电容混合储能系统的响应速度、稳定性等性能,但其外环依然采用基于 PID 的控制方法,在一定程度上限制了系统的整体表现。

本文针对光伏发电系统对储能特性的需求,提出了一种应用于蓄电池-超级电容混合储能变换器的模型预测整体控制方法。首先建立了混合储能变换器主电路的数学模型,然后基于模型设计了嵌入功率滤波器的模型预测整体控制方法,同时实现了功率分配与母线电压支撑。最后,通过仿真分析了整体控制方法的功率响应特性与参数鲁棒性。分析表明,与基于 PID 的双环控制方法相比,采用本文所提出的模型预测整体控制方法时,蓄电池-超级电容混合储能变换器在功率响应与母线电压支撑方面表现出快速的响应特性,而且能够适应参数变化的实际应用条件。

1 基于 MPC 的混合储能整体控制方法

1.1 混合储能变换器主电路的数学模型

混合储能变换器主电路结构如图 3 所示,使用两路双向 Buck-Boost 并联而成,分别提供蓄电池和

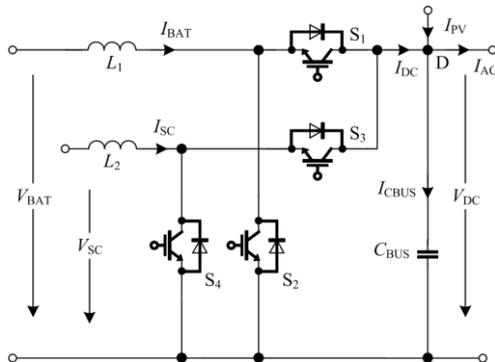


图 3 混合储能双向 DC/DC 变换器主电路
Fig. 3 Main circuit of hybrid energy storage bidirectional DC/DC converter

超级电容接口。图中 V_{BAT} 、 I_{BAT} 为蓄电池电压和电流, V_{SC} 、 I_{SC} 为超级电容电压和电流, C_{BUS} 为直流母线电容, V_{DC} 为直流母线电压。D 为直流侧公共连接点, I_{DC} 为储能变换器输出电流, I_{PV} 为光伏输入至母线的电流, I_{CBUS} 为流向直流母线电容的电流, I_{AC} 为流向后级 DC/AC 变换器的电流。

为了设计基于 MPC 的混合储能整体控制方法,需首先建立变换器主电路的离散数学模型。根据图 3, S_1 和 S_2 互补开关实现对蓄电池接口的能量转换, S_3 和 S_4 互补开关实现对超级电容接口的能量转换。据此可建立两路转换电路的连续数学模型为

$$L_1 \frac{dI_{BAT}}{dt} = V_{BAT} - V_{DC} \cdot S_{w1} \quad (1)$$

$$L_2 \frac{dI_{SC}}{dt} = V_{SC} - V_{DC} \cdot S_{w3} \quad (2)$$

式中: S_{w1} 为 S_1 的开关信号; S_{w3} 为 S_3 的开关信号, 1 表示开通, 0 表示关断。当采样周期为 T_s 时, 可得到对应的离散模型为

$$I_{BAT}(k+1) = I_{BAT}(k) + \frac{T_s}{L_1} (V_{BAT}(k) - V_{DC}(k) \cdot S_{w1}(k)) \quad (3)$$

$$I_{SC}(k+1) = I_{SC}(k) + \frac{T_s}{L_2} (V_{SC}(k) - V_{DC}(k) \cdot S_{w3}(k)) \quad (4)$$

式中, k 为采样时刻。

1.2 混合储能变换器整体控制方法

本文将混合储能变换器的蓄电池接口、超级电容接口看成一个整体,利用 MPC 方法,通过嵌入功率滤波器,形成混合储能变换器的整体控制策略。混合储能变换器需同时为光伏发电系统提供能量缓冲与母线支撑作用,其中系统直流侧各部分的功率平衡可通过公共连接点 D 处的电流关系体现,即

$$I_{DC} + I_{PV} = I_{CBUS} + I_{AC} \quad (5)$$

而母线电压的变化由流入母线电容的电流 I_{CBUS} 直接决定,即

$$I_{CBUS} = C_{BUS} \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (6)$$

通过式(6)可以看出,母线电压应通过 I_{CBUS} 进行控制。假设经过 N 步调整后,母线电压达到参考值 V_{DCREG} , 则 I_{CBUS} 电流应满足

$$I_{CBUS}(k+1) = \frac{C_{BUS}}{T_s} (V_{DC}(k+1) - V_{DC}(k)) = \frac{C_{BUS}}{NT_s} (V_{DCREG} - V_{DC}(k)) \quad (7)$$

根据式(5)可得

$$I_{DC}(k+1) = I_{CBUS}(k+1) + I_{AC}(k) - I_{PV}(k) \quad (8)$$

对应的功率需求为

$$P_{\text{HSREG}} = I_{\text{DC}}(k+1) \cdot V_{\text{DCREG}} \quad (9)$$

该功率需由混合储能提供, 根据蓄电池和超级电容的功率特性, 低频部分应由蓄电池提供, 高频部分由超级电容响应。对 P_{HSREG} 应用离散低通滤波器可得

$$P_{\text{BATREG}} = q \cdot P_{\text{HSREG}} + (1-q) \cdot P_{\text{BATREG}}(k-1) \quad (10)$$

$$P_{\text{SCREG}} = P_{\text{HSREG}} - P_{\text{BATREG}} \quad (11)$$

式中: P_{BATREG} 为分配到蓄电池的功率需求; P_{SCREG} 为分配到超级电容的功率需求; $q = 2\pi f_c T_s$, f_c 为截止频率。考虑到蓄电池和超级电容的电压均不能突变, 则二者能够提供的功率可分别表示为

$$P_{\text{BAT}}(k+1) = I_{\text{BAT}}(k+1) \cdot V_{\text{BAT}}(k) \quad (12)$$

$$P_{\text{SC}}(k+1) = I_{\text{SC}}(k+1) \cdot V_{\text{SC}}(k) \quad (13)$$

根据母线支撑与能量需求的控制目标, 结合双向 DC-DC 变换器的数学模型, 利用式(14)和式(15)所示的目标函数即可实现对混合储能变换器的整体控制^[25]。基于以上推导, 最终确定混合储能变换器的整体控制方法如图 4 所示。该方法在实现过程中未使用 PID 调节器, 结构简单, 避免了耗时较长的参数校正环节。第 2 节将通过仿真证明该方法在功率响应特性与参数鲁棒性方面的优越性。

$$J_{\text{BAT}} = |P_{\text{BATREG}} - P_{\text{BAT}}(k+1)| \quad (14)$$

$$J_{\text{SC}} = |P_{\text{SCREG}} - P_{\text{SC}}(k+1)| \quad (15)$$

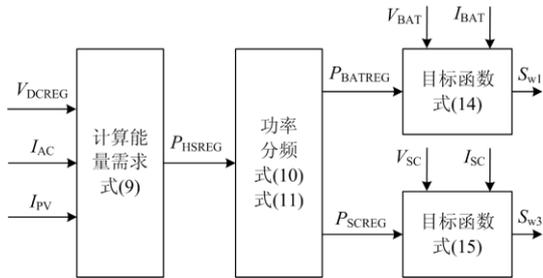


图 4 混合储能变换器的 MPC 整体控制方法

Fig. 4 Overall MPC control method of hybrid energy storage converter

2 仿真分析

2.1 功率特性分析

为了验证采用所提出的模型预测整体控制方法时混合储能变换器的功率特性, 在 Simulink 中建立了光伏储能发电系统的仿真模型, 并通过模拟光伏电池发电功率与交流侧负载需求功率的变化, 分析混合储能的功率响应及母线电压支撑特性。仿真模型各部分的参数见表 1, 仿真过程中光伏电池在各个时段的功率变化情况见表 2。

图 5 为光伏出力及交流侧功率需求发生变化时

混合储能的功率响应波形, 其中图 5(a)为光伏发电功率, 图 5(b)为蓄电池功率, 图 5(c)为超级电容功率。在 0~4 s, 交流侧功率需求为 10 kW, 混合储能根据光伏发电功率的变化调整自身功率, 对其进行补偿, 实现系统各部分的功率均衡。蓄电池负责稳态功率的缓冲, 在 0~2.75 s 及 3.5~4 s 放电, 补充光伏功率的不足。在 2.75~3.5 s, 由于光伏功率过剩, 蓄电池充电工作, 吸收剩余功率。超级电容在稳态工作时的输出功率接近为零, 仅负责对瞬态功率进行响应。在 3.5 s 处, 光伏功率出现快速跌落, 超级电容迅速作出响应, 提高功率输出, 辅助蓄电池完成过渡。为了分析系统对交流功率需求的响应特性, 在 4 s 处将功率需求由 10 kW 切换至 5 kW。此时光伏功率由不足变为过剩, 混合储能由输出功率状态切换为吸收功率状态, 超级电容吸收切换时刻的短时功率, 切换完成后由蓄电池吸收光伏的剩余功率。通过分析可以看出, 采用模型预测整体控制方法时, 混合储能变换器可以实现光伏发电与负载需求的功率缓冲, 且在功率突变时具有快速的响应特性, 充分发挥了蓄电池与超级电容的互补功率特性。

表 1 混合储能变换器仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the hybrid energy storage converter

参数名称	参数值
蓄电池额定电压/V	370
蓄电池初始 SOC	100%
超级电容容量/F	99.5
超级电容额定电压/V	400
超级电容初始电压/V	370
交流侧额定功率/kW	10
直流母线额定电压/V	800
电感 L_1 、 L_2 /mH	2
母线电容 C_{BUS} /μF	100
MPC 控制采样时间/μs	5
PID 控制开关频率/kHz	50

表 2 光伏电池在各仿真时段的功率

Table 2 Power of photovoltaic cell during each simulation period

时间 t	功率值 P_{PV} /kW
0~1 s	8
1~1.5 s	8-8t
1.5~2 s	4
2~3 s	4+8t
3~3.5 s	12
3.5~5 s	6.4

图 6 为以上功率条件下混合储能变换器关键点的工作波形，其中图 6(a)为直流母线电压波形，图 6(b)为蓄电池输出电流波形，图 6(c)为超级电容输出电流波形。可以看出，在功率变化的各个时间段内，混合储能变换器均能够保持母线电压稳定，蓄电池与超级电容的输出电流根据功率需求进行变化。在功率关系发生突变的 3.5 s 与 4 s 处，超级电容输出电流迅速响应，提供短时功率缓冲，蓄电池输出电流实现缓慢过渡。二者的电流响应特性与图 5 所示各自功率的变化相符，证明了控制策略对功率分频的实现，这不仅保证了母线电压在功率扰动时的快速响应特性，在实际使用中也将有助于延长蓄电池的使用寿命。

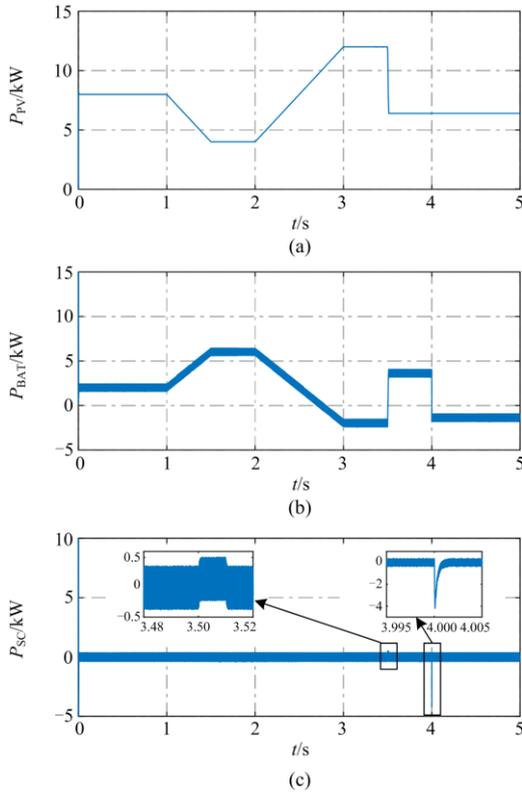


图 5 混合储能变换器的功率响应

Fig. 5 Power responses of the hybrid energy storage converter

为了验证采用模型预测整体控制方法时混合储能变换器的母线电压支撑能力，图 6(a)同时给出了采用传统 PID 双环控制时的直流母线电压波形。为了保证对比的公平性，MPC 控制采用表 1 所示的采样周期，获得与传统 PID 双环控制几乎相同的开关频率。通过图 6(a)可以看出，在光伏出力与交流侧功率需求稳定的情况下，二者均能维持直流母线电压的稳定。但在光伏功率持续快速变化的 1~1.5 s 与 2~3 s，采用传统 PID 控制的直流母线电压无法

准确跟踪参考值，产生一定的跟踪误差。同样，在功率关系发生突变的 3.5 s 与 4 s 时，采用传统控制的母线电压出现较大的扰动。而当采用模型预测整体控制方法时，混合储能变换器在两种情况下均能实现快速调节，维持母线电压稳定，具有较好的响应特性。因此，对混合储能变换器应用本文所提出的模型预测整体控制方法可使其具有较强的母线电压支撑能力，进而为光伏发电系统进行快速功率响应提供有力保证。

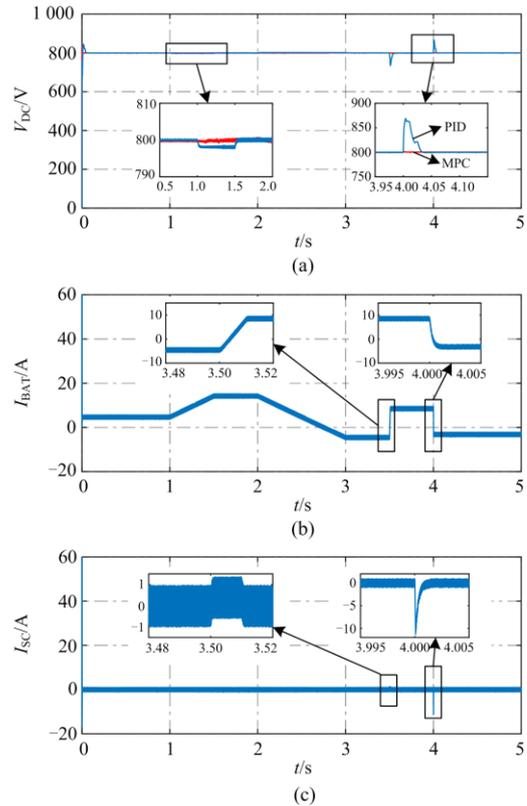


图 6 混合储能变换器工作波形

Fig. 6 Operating waveforms of the hybrid energy storage converter

2.2 参数鲁棒性分析

MPC 控制方法基于变换器的数学模型实现，而实际系统中的电路参数在不同运行条件下存在一定的不确定性。因此，本节将针对混合储能变换器的关键电路参数，对所提出的模型预测整体控制方法进行鲁棒性分析，以验证其在实际应用中的可行性。在图 3 所示的混合储能变换器中，电感 L_1 、 L_2 和电容 C_{BUS} 为其主要电路参数，直流母线电压为其主要性能指标。因此，通过分析主要电路参数变化时直流母线电压的误差情况即可验证控制方法的鲁棒性。

基于第 1 节所建立的仿真模型，通过设置光伏功率使混合储能变换器分别工作在输出功率与吸收

功率模式下, 观察直流母线电压在不同电路参数下的误差变化。此处直流母线电压误差定义为

$$V_{DC_error} = V_{DC} - V_{DCREG} \quad (16)$$

图 7 给出了电感 L_1 、 L_2 取不同值时的直流母线电压误差, 可以看出虽然电感取值存在较大的变化(最大为额定值 2 mH 的 200%), 直流母线电压的误差始终限制在 1 V 以内。此外, 通过对比不同电感

下的误差波形可以发现, 增大电感值有助于减小母线电压误差。但采用大的电感值将会为变换器带来较大的功率损耗, 影响变换器的效率。由于本文主要分析混合储能变换器的功率响应与母线支撑能力, 对于电路参数的优化设计将作为后续研究, 在此不再赘述。

由式(6)和式(7)可知, 母线电容的取值直接影响母线电压的变化。而在实际应用中, 系统各部分间存在连接或断开操作, 不可避免地引起母线电容的变化。因此, 混合储能变换器对母线电容变化的鲁棒性对于保证系统稳定具有尤其重要的作用。图 8 为不同母线电容下的直流母线电压误差波形, 同样可以看出, 当母线电容发生较大范围的变化时(最大为额定值 100 μF 的 200%), 混合储能变换器依然可以保证母线电压误差不超过 1 V, 具有较强的母线支撑能力。此外, 通过对比可以发现, 与电感类似, 增大母线电容同样有助于降低直流母线电压误差。

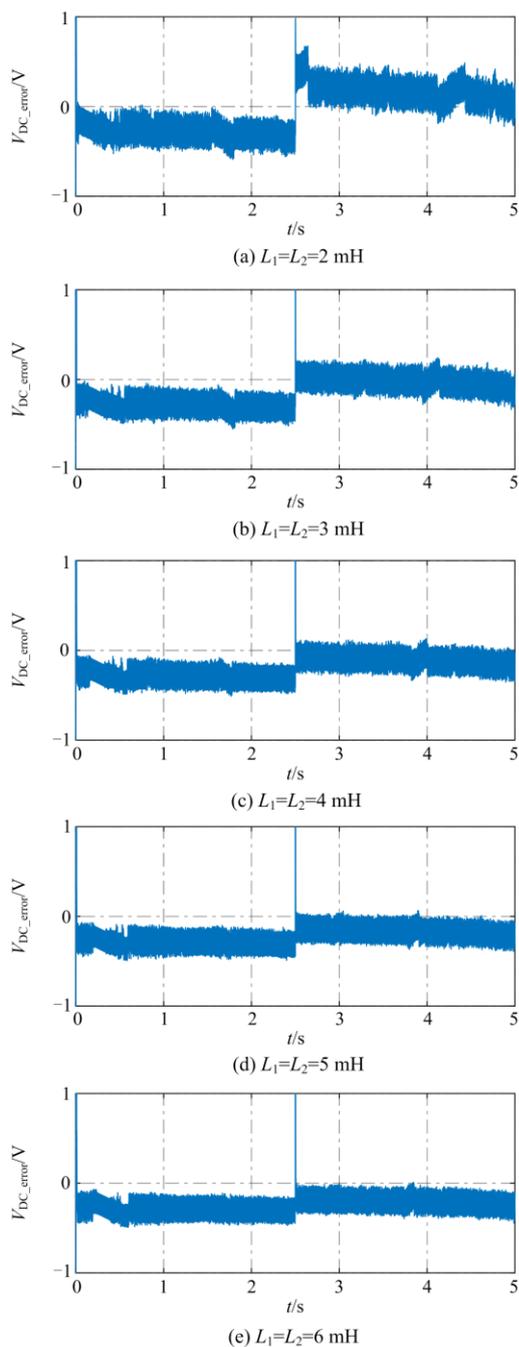
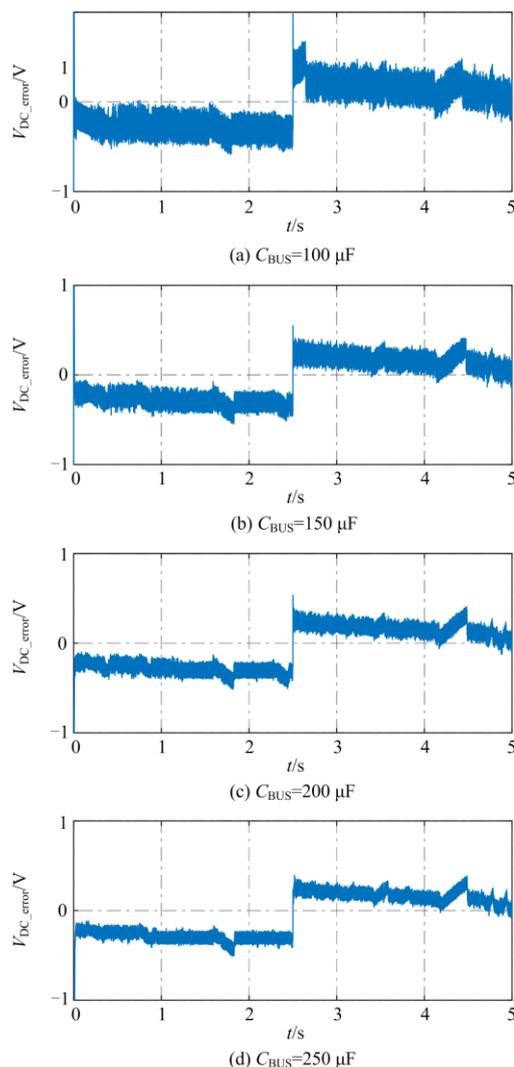


图 7 电感变化时的直流母线电压误差

Fig. 7 DC bus voltage errors with different inductances



(d) $C_{BUS}=250 \mu\text{F}$

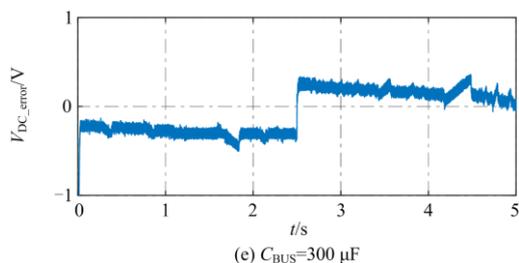


图 8 电容变化时的直流母线电压误差

Fig. 8 DC bus voltage errors with different capacitances

经过以上仿真分析可以看出, 本文所提出的模型预测整体控制方法具有较好的功率响应特性与参数鲁棒性。应用于光伏发电系统的混合储能变换器中, 可以帮助其实现对系统各部分功率变化的快速响应, 提供稳定的直流母线电压支撑, 提升系统整体性能。在变换器主要参数存在较大偏差的情况下, 依然可以实现对直流母线电压的准确跟踪, 保证了在实际应用中的可行性。

3 结论

针对新能源发电系统对于功率稳定性与响应快速性的需求, 基于模型预测控制方法与功率滤波器的思想, 提出了一种适用于光伏发电系统中蓄电池-超级电容混合储能变换器的模型预测整体控制方法, 用于提高混合储能变换器对系统功率波动的缓冲能力与直流母线电压的支撑能力。光伏出力与负载需求变化情况下的仿真结果表明, 所提出的模型预测整体控制方法充分发挥了超级电容的快速功率响应特性, 在系统功率关系突变时辅助蓄电池完成过渡, 不仅提升了系统整体的功率响应速度, 且在实际使用中有助于延长蓄电池的使用寿命。在与传统 PID 控制方法的对比分析中, 提出的模型预测整体控制方法表现出优越的直流母线电压支撑能力。变换器关键参数变化时的误差分析结果表明, 提出的模型预测整体控制方法具有较强的参数鲁棒性, 适用于实际工程应用。

参考文献

- [1] 黄靖, 殷世杰. 含高渗透率光伏发电的直流配电网协调控制研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(12): 1856-1861. HUANG Jing, YIN Shijie. Research on coordinated control of DC distribution network with high permeability photovoltaic power generation[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(12): 1856-1861.
- [2] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77. LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal

- allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [3] YOO H, SUL S K, PARK Y, et al. System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(1): 108-144.
- [4] 吴晓刚, 侯维祥, 帅志斌, 等. 电动汽车复合储能系统的功率分配优化研究[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(11): 110-120. WU Xiaogang, HOU Weixiang, SHUAI Zhibin, et al. Power distribution optimization for electric vehicles with hybrid energy storage system[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(11): 110-120.
- [5] 程志江, 李永东, 谢永流, 等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2739-2745. CHENG Zhijiang, LI Yongdong, XIE Yongliu, et al. Control strategy for hybrid energy storage of photovoltaic generation microgrid system with super capacitor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2739-2745.
- [6] YOO H, SUL S K, PARK Y, et al. System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(1): 108-144.
- [7] 郭焱, 张权宝, 郭将驰, 等. 基于 DAB 变换器的舰船中压直流混合储能系统端电压限制[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(1): 77-84. GUO Yi, ZHANG Quanbao, GUO Jiangchi, et al. Voltage limitation of ship MVDC hybrid energy storage system based on DAB converters[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(1): 77-84.
- [8] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 444-453. WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444-453.
- [9] D'ARCO S, SUULA J A, FOSSO O B. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in smart grids[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 122: 180-197.
- [10] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.

- [11] 温春雪, 杨春来, 陈丹, 等. 虚拟同步储能变换器的功率环双模式控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 56-60.
WEN Chunxue, YANG Chunlai, CHEN Dan, et al. Power-loop dual-mode control of virtual synchronous energy storage converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 56-60.
- [12] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.
SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [13] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [14] KOLLIMALLA S K, MISHRA M K, UKIL A, et al. DC grid voltage regulation using new HESS control strategy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 772-781.
- [15] ZHOU H, BHATTACHARYA T, TRAN D, et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 923-930.
- [16] 文波, 秦文萍, 韩肖清, 等. 基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 892-898.
WEN Bo, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control strategy of hybrid energy storage systems in DC microgrid based on voltage droop method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892-898.
- [17] SHAN Yinghao, HU Jiefeng, LI Zilin, et al. A model predictive control for renewable energy based ac microgrids without any pid regulators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9122-9126.
- [18] MA Z, SAEID S, RALPH K. FPGA implementation of model predictive control with constant switching frequency for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2055-2063.
- [19] TIN B, SANDOR I, DAMIR S, et al. Model predictive direct current control of a permanent magnet synchronous generator based on flexible Lyapunov function considering converter dead time[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2899-2912.
- [20] 金楠, 郭磊磊, 窦智峰, 等. 清洁能源发电并网逆变器有限状态模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(4): 89-97.
JIN Nan, GUO Leilei, DOU Zhifeng, et al. Finite states model predictive control for grid-connected inverter of clean energy power generation[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(4): 89-97.
- [21] 董润楠, 刘石, 梁庚, 等. 基于模型预测控制的微电网逆变器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 11-20.
DONG Runnan, LIU Shi, LIANG Geng, et al. Research on control method of special inverter in micro-grid based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 11-20.
- [22] 薛花, 邓兴成, 王艳青, 等. 基于优化控制集模块化多电平变换器模型预测控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 9-18.
XUE Hua, DENG Xingcheng, WANG Yanqing, et al. Optimized control set based model predictive control strategy for modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 9-18.
- [23] 杨惠, 晁凯悦, 孙向东, 等. 基于开关序列的光伏储能双向 DC-DC 变换器预测电流控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 300-307.
YANG Hui, CHAO Kaiyue, SUN Xiangdong, et al. Predictive current control method of photovoltaic energy storage for bidirectional DC-DC converter based on switching sequence[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 300-307.
- [24] 于明, 王毅, 李永刚. 基于预测方法的直流微网混合储能虚拟惯性控制[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1526-1532.
YU Ming, WANG Yi, LI Yonggang. Virtual inertia control of hybrid energy storage in dc microgrid based on predictive method[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1526-1532.
- [25] SHAN Y H, HU J F, CHAN K W, et al. Model predictive control of bidirectional dc/dc converters and ac/dc interlinking converters — a new control method for PV-wind-battery microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1823-1833.

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-04-06

作者简介:

吴 鸣(1981—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究生导师, 中国电力科学研究院配电所微网室主任, 研究方向为分布式发电, 储能及微电网的关键装备优化配置与协调控制, 直流配电关键技术与装备等; E-mail: wuming@ep-ri.sgcc.com.cn

李振伟(1991—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方向为电能变换与控制技术; E-mail: lizw@qust.edu.cn

孙丽敬(1981—), 女, 硕士, 研究方向为电力电子及其在配电系统中的应用。E-mail: sunlijing@epri.sgcc.com.cn

(编辑 许 威)