

DOI: 10.7652/xjtuxb201812006

交直流混合微电网双向接口变换器模型预测控制

郭楚佳¹, 张爱民¹, 张杭², 任志刚¹, 张蕾³
(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 3. 西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安)

摘要: 针对双向接口变换器在交流侧三相不平衡状态下出现的直流侧电压振荡型波动、正序电压相位检测困难、有功功率和无功功率计算不准确的问题,提出了一种直接功率模型预测控制方法。首先,利用瞬时电压、电流向量建立系统瞬时功率向量预测模型,以省略功率计算的锁相环节,避免电压相位检测不准确对控制性能的影响;其次,为功率向量的实部和虚部分别设计参考量,抑制实部中负序分量引起的二倍频功率波动,以避免直流侧电压振荡型波动;最后,以功率向量的实部和虚部作为控制单元,分别设计目标函数,消除两者间的相互影响,同时,在目标函数中设计开关频率约束项,使得被控器件开关频率可调。仿真和实验结果表明,所提控制方法可实现无功功率参考变化时,有功功率不受影响,相比于传统 PWM 方法,有功功率超调量下降了约 74%,且该方法可保证系统全功率因数运行,系统直流侧无振荡型波动。

关键词: 交直流混合微网;双向接口变换器;模型预测控制;三相不平衡

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)12-0038-06

A Model Predictive Control Method for Bidirectional Interfacing Converters in Hybrid AC/DC Microgrids

GUO Chujia¹, ZHANG Aimin¹, ZHANG Hang², REN Zhigang¹, ZHANG Lei³
(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A model predictive control strategy is proposed to solve the inevitable DC voltage oscillation, inaccuracy phase information of positive voltage, unclear calculation of the active and reactive power of the bidirectional interfacing converters in three-phase unbalanced condition. Firstly, an instantaneous power vector predictive model is built by using instantaneous voltage and current vector to omit the phase-lock-loop and to avoid the effect of inaccurate voltage phase detection; Secondly, power references are designed for the real and imaginary components of the power vector, respectively, to restrain the double-frequency power caused by the negative sequence component and to eliminate the DC voltage oscillation; Finally, objective functions are designed for the real and the imaginary components of power vector, respectively, to avoid the interaction between them, and a switching frequency limitation part is included in objective functions to make the switching frequency tunable. Simulation and experimental results show that the active power is not influenced by the change of reactive power. A comparison with the

traditional PWM method shows that the proposed method reduces the overshoot of active power by about 74%, the power factor is regulated to 1, and the DC voltage oscillation is eliminated.

Keywords: hybrid AC/DC microgrid; bidirectional converter; model predictive control; three-phase unbalance

随着分布式发电渗透率日益提高,微电网逐渐成为智能电网中的重要环节^[1-2]。近年来,交直流混合微电网逐渐进入研究者的视线。其中,双向接口变换器通过对电流、电压以及功率等变量的控制,保证系统稳定运行,是整个混合微网的核心装置。因此,接口变换器控制策略也成为研究热点^[3]。

在三相不平衡现象发生时,接口变换器控制性能尤其重要。因为系统交流侧,由于负序分量及谐波^[4-5],锁相环节难以快速获得正序电压相位,无法准确计算有功、无功功率。进而,在直流侧,电压持续波动,严重时会导致保护系统误操作,甚至影响大电网的安全运行。以上问题的基本解决思路是抑制交直流两侧功率交换过程中的负序分量。对称分量法是负序分量控制的基础理论^[6-7]。这种方法计算复杂,不适用于实际应用。双 dq 变换法^[8-9]虽不进行正负序计算,但相比于三相平衡状态,矩阵运算量、PI控制器均增加了一倍。分相控制法^[10]是独立计算三相参考量,但需要建立额外校正向量,以抵消参考电流中的零序部分。双环控制^[11-12]中的电压外环直接对电压进行控制,而双向接口变换器并联运行时的上层协同控制通常以功率作为控制指令,控制变量不相同,就会影响功率控制性能。而直接功率控制法^[13-14]为准确获取电压、电流相位,必须考虑三相不平衡状况下难以准确获得正序分量相位的问题。将变量转换到两相静止坐标系下,可以避免相位需求^[15-16],但在三相不平衡状态下,仍旧不可避免的要采取较为复杂的正、负序分量计算。

针对上述双向接口变换器控制面临的问题,本文提出了一种三相不平衡状况下双向接口变换器的模型预测控制(MPC)。该方法直接以功率作为状态变量,省略了锁相环节,避免了正序分量相位检测不准确对控制性能的影响;利用模型预测控制的特点,根据参考功率选择最优控制矢量,省略了复杂的正、负序计算和坐标变换;通过功率的直接控制,匹配双向接口变换器组运行时的上层功率协同控制,实现能量双向流动的同时,为更大规模的交直流混合微网控制器设计奠定了基础。仿真和实验结果表明,控制器具有快速的响应性能,且基本消除了控制过程中有功功率和无功功率的相互影响,功率控制

更加准确。

1 系统结构

本文研究的双向接口变换器如图1所示。交流侧及直流侧分别连接相应的分布式电源、储能单元以及负载等。

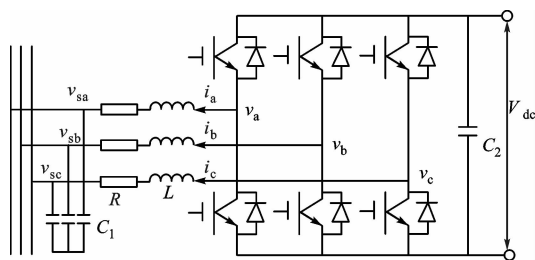


图1 双向接口变换器

考虑到系统的电流电压动态,同时忽略开关器件的固有阻抗,系统三相动态方程的向量模式可表示为

$$L \frac{di_x}{dt} = v_x - Ri_x - v_{s,x} \quad (1)$$

式中: i_x 、 v_x 和 $v_{s,x}$ 分别表示交流侧 x 相(x 为a、b、c)的滤波电感电流、变换器交流侧电压和交流系统电压; L 、 R 为滤波电感、电阻。 v_x 与直流侧电压(V_{dc})、平均电压计算矩阵(u)和器件开关状态(W_i)相关。 $W_i = [w_a, w_b, w_c]^T$,表示三相开关状态。

由此可得系统开关动态方程如下

$$\frac{di_x}{dt} = -\frac{R}{L}i_x + \frac{1}{L}\left(\frac{1}{3}V_{dc}uW_i - v_{s,x}\right) \quad (2)$$

现有针对三相变换器的模型预测控制研究,大多以式(2)为基础,建立电流预测模型,设计模型预测控制器^[17-18],但并不适用于本文所研究的双向接口变换器。

结合前文所述双向接口变换器控制方法存在的问题,针对具体系统结构,本文从以下2个方面对现有模型预测控制方法进行改进:

(1)为准确控制有功功率和无功功率的双向传输,并降低两者间的相互影响,本文对两者分别进行目标函数设计;

(2)为避免使用基于功率因数的功率计算方法,省略锁相环节,本文利用电流、电压向量表达式进行计算,同时使用功率的向量表达模式。

2 三相不平衡情况下的模型预测控制器设计

本文所设计的模型预测控制算法的实现系统框图如图2所示。该控制系统包括预测环节、参考计算环节和优化环节3个部分。

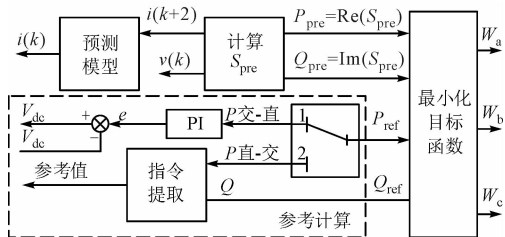


图2 所提模型预测控制算法实现系统框图

2.1 预测环节

现有模型预测控制算法多使用电流、电压作为预测输出。在控制过程中，有功功率和无功功率相互影响，并且需要检测系统相位以计算功率。三相不平衡状态下，锁相环不能快速、准确的提供正序分量的相位信息，影响了功率控制的响应性能。本文采用功率预测方法分别对系统有功功率与无功功率进行控制，在避免计算过程中有功功率和无功功率相互影响的同时，省略了锁相环节，使控制结果更加准确。

将式(2)进行离散化，可得到电流的动态预测模型如下

$$\begin{aligned} i_x(k+1) = f_1[& (i_x(k), \dots, i_x(k-d_1), u(k), \dots, \\ & u(k-d_2), v_{s,x}(k), \dots, v_{s,x}(k-d_3), V_{dc}(k), \dots, \\ & V_{dc}(k-d_4))] \end{aligned} \quad (3)$$

式中： d_1, d_2, d_3 和 d_4 是系统预测阶数； $f_1(\cdot)$ 是系统电流非线性动态函数。可以看出，电流预测表达式是与 $i_x, u, v_{s,x}$ 和 V_{dc} 历史值相关的非线性函数。系统电流一步预测结果可表示为

$$\begin{aligned} i_x(k+1) = & \left(1 - \frac{RT}{L}\right) i_x(k) - \\ & \frac{T}{L} V_{dc}(k) u(k) + \frac{T}{L} v_{s,x}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

变换器交流侧输出 v_x 可表示为

$$v_x = \frac{1}{3} V_{dc} u W_i, \quad i = 0, 1, \dots, 7 \quad (5)$$

根据系统开关状态和预测的电流、电压，可得到功率一步预测结果

$$S(k+1) = \frac{3}{2} i_x(k+1) |i_{s,x}(k+1) \quad (6)$$

利用式(6)所示的预测模型可直接对不同控制

向量作用下的功率进行预测。由于功率预测过程中存在独立的电流预测环节，从而避免了没有电流环引起的电流控制能力减弱和系统过流现象的出现。

2.2 参考计算环节

双向接口变换器在交流侧不平衡状态下运行时需要消除负序分量带来的功率影响，避免直流侧电压的振荡型波动。因此，需要对有功功率和无功功率的参考值进行准确计算和跟踪。本文对三相不平衡状态下的功率传输进行详细分析，利用功率的向量表示方法设计参考值。

根据文献[19]所述功率分析方法，进行不平衡状态下功率计算。三相不平衡电压电流表示为：

$$v_{s,x} = \sqrt{2} v_p e^{j(\omega t + \alpha_1)} + \sqrt{2} v_n e^{-j(\omega t + \alpha_2)} = v_p + v_n^* \quad (7)$$

$$i_x = \sqrt{2} i_p e^{j(\omega t + \alpha_1 + \varphi_1)} + \sqrt{2} i_n e^{-j(\omega t + \alpha_2 + \varphi_2)} = i_p + i_n^* \quad (8)$$

式中： v_p, v_n 和 i_p, i_n 表示电压 $v_{s,x}$ 和电流 i_x 的正序分量和负序分量幅值； v_p, i_p 为电压 $v_{s,x}$ 和电流 i_x 的正序分量向量表示； v_n^*, i_n^* 为电压 $v_{s,x}$ 和电流 i_x 的负序分量向量表示的共轭复数。

根据三相不平衡电流和不平衡电压可以计算出三相总功率

$$\begin{aligned} S = \frac{3}{2} v_{s,x} i_x^* = \\ \frac{3}{2} [(v_p i_p^* + v_n^* i_n) + (v_p i_n + v_n^* i_p^*)] \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)右式第一项表示正序、负序的电流、电压各自引起的功率分量，第二项表示正序、负序的电流、电压交互作用引起的功率分量。为更明确表示两种功率，将其展开为直观的三角函数表达

$$\begin{aligned} S = 3[& (v_p i_p \cos(\phi_1) + v_n i_n \cos(\phi_2)) + \\ & \dots + j(v_p i_p \sin(-\phi_1) + v_n i_n \sin(\phi_2))] + \\ & 3[& (v_p i_n \cos(2\omega t + \alpha_1 + \alpha_2 + \phi_2) + \\ & \dots + v_n i_p \cos(2\omega t + \alpha_1 + \alpha_2 + \phi_1)) + \\ & j(v_p i_n \sin(2\omega t + \alpha_1 + \alpha_2 + \phi_2) + \\ & \dots + v_n i_p \sin(2\omega t + \alpha_1 + \alpha_2 + \phi_1))] \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知，视在功率实部中包含二倍频波动部分。这部分功率直接引起接口变换器直流侧电压的振荡型波动。在三相不平衡状态下，为避免因不能快速检测正序分量相位引起的有功功率、无功功率计算不准确的问题，本文方法中，不区分有功功率和无功功率，而是针对视在功率表达式中的实部和虚部单元，分别进行控制。

针对双向接口变换器，其功率传输包括交流侧到直流侧和直流侧到交流侧两种。当功率由交流侧到直流侧传输时，其有功功率目标为保持直流侧电

压恒定, 无功功率参考值为已知指令值 Q_1 ; 当功率由直流侧到交流侧传输时, 其有功功率目标为一已知指令值 P_2 , 由上层控制器下发。同样的, 当交流侧需要无功功率支撑时, 其参考值同样为已知指令值 Q_2 。则本文所设计的模型预测控制器参考指令如下所示。

交流到直流时, 有

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}(S_{\text{ref}}) &= K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt \right) \\ \text{Im}(S_{\text{ref}}) &= Q_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $\text{Re}(S_{\text{ref}})$ 和 $\text{Im}(S_{\text{ref}})$ 为参考复功率的实部和虚部; e 为电压偏差, 表示为 $e = V_{\text{dc}}^* - V_{\text{dc}}$ 。

直流到交流时, 有

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}(S_{\text{ref}}) &= P_2 \\ \text{Im}(S_{\text{ref}}) &= Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

因此, 总补偿功率参考值复数可表示为

$$S_{\text{ref}} = \text{Re}(S_{\text{ref}}) + \text{Im}(S_{\text{ref}}) \quad (13)$$

2.3 优化环节

传统模型预测控制中, 优化环节均以电流或电压的无差跟踪作为控制目标。但在三相不平衡情况下, 传统方法不能消除系统有功功率和无功功率间的影响, 并且传输功率的计算受锁相环影响。除此之外, 模型预测控制省去了调制环节, 往往会引起开关频率过高、损耗过大的问题。本文针对上述两个问题设计了新的目标函数。首先, 利用功率向量作为控制变量, 分别为实部和虚部设计无差跟踪的目标函数, 最大程度的消除了两者的相互影响, 同时不需要正序分量的相位信息, 避免了锁相环节; 其次, 在目标函数中加入开关频率控制模块, 使得开关频率始终在一个可接受的范围内, 以减少不必要的开关损耗。

目标函数包括功率实部、虚部和开关状态变量 3 个部分, 具体表示如下

$$g = \lambda_1 | \text{Im}(S_{\text{ref}}) - \text{Im}(S_{\text{pre}}) | + \dots + \lambda_2 | \text{Re}(S_{\text{ref}}) - \text{Re}(S_{\text{pre}}) | + \dots + \lambda_3 n \quad (14)$$

式中: $\text{Re}(S_{\text{pre}})$ 和 $\text{Im}(S_{\text{pre}})$ 为预测值的实部和虚部; n 表示系统开关状态变化次数, 表示从 $k-1$ 时刻到 k 时刻, N 个开关器件对应的总开关状态变化次数, 表示为

$$n = \sum_{i=1}^N |W_i(k) - W_i(k-1)|$$

$$W_i = W_1, W_2, \dots, W_N \quad (15)$$

λ_1, λ_2 为分段控制权重因子, 公式如下

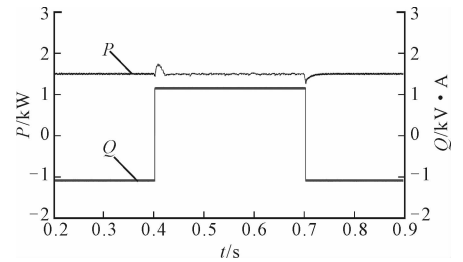
$$\lambda_1 = \begin{cases} a_{\min}, & |V_{\text{dc}}^* - V_{\text{dc}}| > V_{\text{th}} \\ a_{\max}, & |V_{\text{dc}}^* - V_{\text{dc}}| < V_{\text{th}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} b_{\min}, & |V_{\text{dc}}^* - V_{\text{dc}}| < V_{\text{th}} \\ b_{\max}, & |V_{\text{dc}}^* - V_{\text{dc}}| > V_{\text{th}} \end{cases}$$

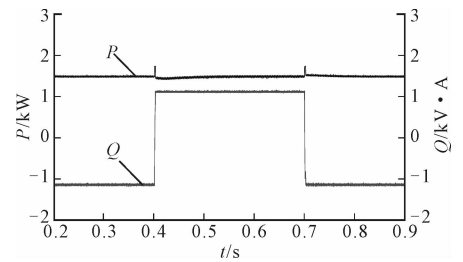
当直流电压差大于阈值 V_{th} 时, 目标函数中电压控制项(实部)权重重大, 使得电容电压快速跟踪设定值; 当直流电压差小于阈值 V_{th} 时, 无功补偿项(虚部)权重变大, 使得系统持续补偿无功功率。 λ_3 为开关频率限制因子, 可使得控制算法均衡了最小误差以及开关频率限制两个优化目标, 给出控制矢量的局部最优解。大量仿真表明, λ_3 与系统开关频率有一对一的映射关系。

3 仿真实验

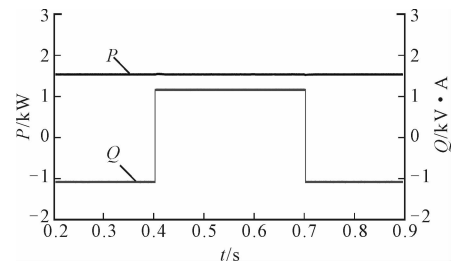
为了验证本文所提算法的有效性, 将本文所提方法与常规 PWM 调制方法和基于电流的模型预测控制方法进行比较, 有功功率 P 和无功功率 Q 的响应曲线如图 3 所示。



(a) 传统 PWM 控制结果



(b) 基于电流的模型预测控制结果



(c) 本文方法控制结果

图 3 3 种方法的有功功率和无功功率响应曲线

常规 PWM 方法的调制频率固定,本文所述方法开关频率与目标函数中权重 λ_3 一一对应,基于电流的 FCS-MPC,开关频率只能通过设定采样频率来调节。为了在比较时使得 3 种方法的调制频率基本一致, λ_3 设定为 0.001,此时,本文所设计的模型预测方法中器件开关频率约为 1 440 Hz。相应地,设置 PWM 载波频率和基于电流 FCS-MPC 的开关频率为 1 440 Hz。

仿真中,无功功率参考为预设值。无功功率的设定值在 0.4 s 时阶跃增加,在 0.7 s 时恢复,基于电流的 FCS-MPC 方法,选择无功电流作为变化的参考值。图 3a 所示为基于静态解耦的 PWM 调制方法控制结果。明显可见,当无功功率参考值变化时,有功功率影响严重,超调量约为 16%、响应时间约为 0.05 s。图 3b 所示为基于电流的 FCS-MPC 方法仿真结果,相比于传统 PWM 方法,一定程度上减弱了有功功率和无功功率的相互影响,但有功功率仍存在一定的波动,超调量约为 16%、响应时间约为 0.05 s。图 3c 所示为本文所述方法的控制结果。由图可知,超调量约为 4.1%、响应时间约为 0.02 s。由此可得,采取本文方法,可基本消除有功功率和无功功率的相互影响。

4 实验结果

为进一步验证本文方法的性能,搭建实验平台对无功功率双向输送切换和直流侧电压性能开展了实验研究和分析。FCS-MPC 采样频率设置为 20 kHz,有效的开关频率可达到 3 kHz。双向接口变换器实验平台如图 4 所示。整个系统由变压器、三相桥、电容组、电抗器、控制板和负载组成。50 V 系统的相关电路参数设置如表 1 所示。

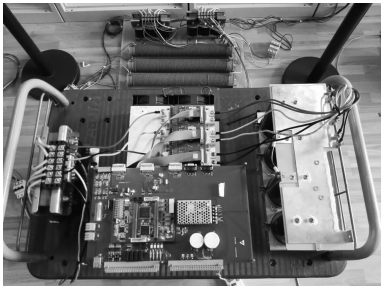


图 4 实验平台

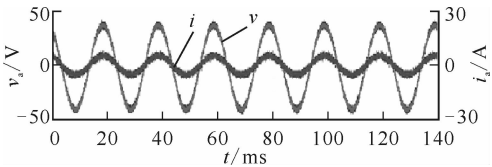
实验过程中的器件开关频率与仿真过程相同。设置目标函数中开关频率权重因子 λ_3 为 0.001,开关频率约为 1 440 Hz。

实验过程针对全有功功率传输、有功功率和无

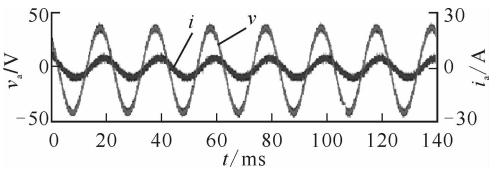
表 1 实验系统参数

参数	数值
系统电压 V_{abc}/V	50
系统频率 f/Hz	50
电感 L_{IC}/mH	10
电阻 R_{IC}/Ω	10
电容 $C_{\text{IC}}/\mu\text{F}$	2 200

功率同时传输的稳态波形以及全有功功率传输的动态波形进行观察。不同情况下 a 相的系统电压 v_a 和电流 i_a 的波形如图 5 和图 6 所示。由图 5 可得,有功功率输送时,可保证电流电压同相位;当需要无功功率供给时,可实现有功功率与无功功率同时传输,保证交流侧高功率因数运行。无功功率传输的动态过程如图 6 所示。在 $t=68\text{ ms}$ 时刻,无功功率参考值大小不变、方向相反。由于本文方法省略了调制环节,故当参考值变化时,输出即刻改变,调节时间短。



(a) 仅有有功功率传输



(b) 有功功率与无功功率同时传输

图 5 电流电压稳态波形

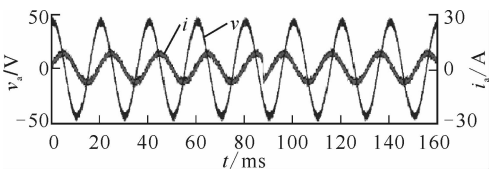


图 6 无功功率突变动态响应波形

系统直流侧电压响应如图 7 所示。由图 7 可见,在交流侧系统三相电压不平衡状态下,本文方法可保证直流侧电压恒定、无振荡型波动,有较好的控

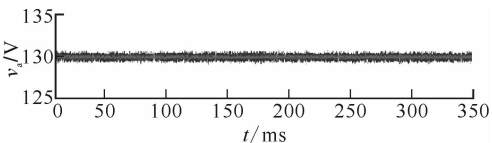


图 7 直流侧电压波形

制性能。

本文方法在目标函数设计时考虑了开关频率约束条件。为验证控制因子 λ_3 对开关频率的影响,对系统触发信号进行观察。由图 8 可知,触发信号 λ_3 变大时,开关频率明显降低,且短时触发脉冲减少,减少了系统开关损耗,增强了系统的触发可靠性。

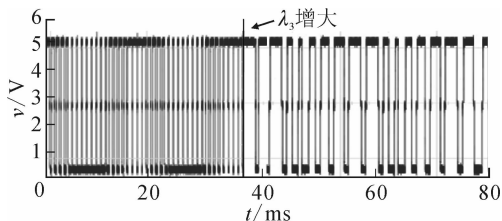


图 8 开关器件触发信号

5 结 论

本文提出了一种交流三相不平衡状态下双向接口变换器的模型预测控制方法。该方法利用功率作为状态变量,不需要正序分量的相位信息,从而避免了锁相环节;分别以功率向量的实部和虚部作为控制目标设计目标函数,最大程度消除了有功功率和无功功率之间的相互影响,抑制了直流电压振荡型波动,同时避免了三相不平衡状态下复杂的正、负序分量计算和坐标变换;通过功率的直接控制,匹配双向接口变换器组运行时的上层功率协同控制,在实现能量双向流动的同时,为更大规模的交直流混合微网控制器设计奠定了基础。仿真实验结果验证了该控制方法可以基本消除有功功率和无功功率的相互影响。实验结果表明,该方法功率控制准确、直流电压平稳,并且解决了模型预测控制开关频率不可调节的问题。

参考文献:

- [1] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10.
- [2] PRAVEEN G, PRIYANKA P, FRANCIS C. AC/DC-based hybrid AC/LVDC micro-grid [J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(4): 521-528.
- [3] SUN K, WANG X, LI Y W, et al. Parallel operation of bidirectional interfacing converters in a hybrid AC/

DC microgrid under unbalanced grid voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(3): 1872-1884.

- [4] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-97.
WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-97.
- [5] AHMED E N, ERLICH I. Control approach of three-phase grid connected PV inverters for voltage unbalance mitigation in low-voltage distribution grids [J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 10(10): 1577-1586.
- [6] FORTESCUE C L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1918, 7(2): 1027-1140.
- [7] 车学哲, 沈凤龙, 王建辉, 等. 基于瞬时对称分量法的电网无功补偿方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 107-112.
CHE Xueze, SHEN Fenglong, WANG Jianhui, et al. Reactive power compensation for power system based on instantaneous symmetrical component method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(2): 107-112.
- [8] 马皓, 林钊, 王小瑞. 不平衡非线性负载下三相逆变器的建模与控制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 83-95.
MA Hao, LIN Zhao, WANG Xiaorui. Modeling and control of three-phase inverter powering unbalanced and nonlinear loads [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 83-95.
- [9] JIANG W, WANG Y, WANG J P, et al. Maximizing instantaneous active power capability for PWM rectifier under unbalanced grid voltage dips considering the limitation of phase current [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 36(10): 5998-6009.
- [10] SHI Y, LIU B, SHI Y, et al. Individual phase current control based on optimal zero sequence current separation for a star-connected cascade STATCOM under unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(3): 2099-2110.
- [11] CHEN X, SHEN B, CHEN D, et al. The three-phase unbalanced overvoltage suppression method based on double-loop PI control for distribution network [C] //

(下转第 105 页)