

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240110

# 基于模型预测控制的输入并联输出串联双有源 桥变换器均压控制策略

马智, 蔺红, 樊艳芳

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

**摘要:** 以双有源桥变换器(dual-active-bridge converters, DAB)为子模块、输入端并联输出端串联(input parallel output series, IPOS)构成的 IPOS-DAB 变换器是全直流风电系统实现风电直流汇集与送出的关键枢纽。IPOS-DAB 变换器在工程实际应用中元器件参数存在差异, 并串联时不同 DAB 子模块输出功率不均衡, 导致 DAB 子模块输出电压电流不均衡, 进而会造成子模块损坏的机率大增, 极大地降低了系统的可靠性。传统均压控制存在可靠性较低、动态性能不足的问题, 因此无法满足外部动态扰动时的控制要求。针对此问题, 结合模型预测控制(model predictive control, MPC)方法的优势, 采用模型预测控制对 IPOS-DAB 变换器进行均压控制。首先根据 IPOS-DAB 变换器建立预测模型, 然后设计控制目标函数及整体控制策略。最后在 Matlab/Simulink 中搭建系统模型, 在不同工况下与传统均压控制进行对比仿真验证, 证明了所提控制策略具有更好的均压控制效果。

**关键词:** 双有源桥变换器; 单重移相控制; 全直流风电系统; 均压控制; 模型预测控制; 风电直流外送

## Model predictive control-based voltage equalization control strategy for an input-parallel output-series dual active bridge converter

MA Zhi, LIN Hong, FAN Yanfang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, China)

**Abstract:** The IPOS-DAB converter, which takes dual-active-bridge converters (DAB) as a sub-module, and with input parallel output series (IPOS), is the key hub of a full-DC system realizing wind power DC convergence and delivery. The component parameters of an IPOS-DAB converter in actual engineering application are different, and the output power of different DAB modules when parallel/series connection is unbalanced results in DAB module output voltage and current imbalance. This will increase the sub-module damage rate, greatly reducing system reliability. Conventional voltage equalization control suffers from low reliability and insufficient dynamic performance, and therefore cannot meet the control requirements during external dynamic disturbances. To address these problems, this paper uses the advantages of a model predictive control (MPC) method and adopts it for voltage equalization control of an IPOS-DAB converter. First, the prediction model is established from the IPOS-DAB converter. Then, the control objective function and the overall control strategy are designed. Finally, the system model is constructed in Matlab/Simulink. Compared with traditional voltage equalization control in different working conditions, the proposed control strategy has a better voltage equalization control effect.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52367012).

**Key words:** DAB converter; single phase shifting; all-DC wind power system; voltage equalization control; model predictive control; wind power DC outflow

## 0 引言

随着西部地区风电总装机量不断增长, 西电东

送规模已超过 3 亿 kW, 采用柔性直流技术的常规点对点特高压直流输电, 存在系统无功充电电流大、多次换流升压损耗较大、经济性较差等问题。因此有学者提出了全直流风电系统的概念, 相比于现有的交流汇集-直流传输的风电系统, 全直流风电系统在建设成本、系统损耗等方面具有显著优势。为提

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52367012); 新疆维吾尔自治区重点研发专项项目(2022B01020-3)

高远距离输电效率及直流输电经济性,全直流风电系统成为研究热点<sup>[1-3]</sup>。

高压大容量、高增益直流变换器是实现全直流风电系统中压直流汇集与高压直流送出的枢纽。为了实现直流变压器的性能优化,对直流变换器的拓扑结构和控制策略的研究具有重要意义,对于推动全直流风电系统的规模化发展具有重要的学术意义与工程应用前景<sup>[4-5]</sup>。

双有源桥变换器(dual-active-bridge converters, DAB)因具有拓扑结构对称、可以实现功率的双向传输、通过模块化串并联组合能提升传输功率等级<sup>[4,6-7]</sup>、降低开关器件的电压和电流应力、提高系统的运行可靠性的优点,已成为目前研究的热点。由于本文研究背景是全直流风电系统具有高电压、大容量的特征,且需要 DAB 组合变换器能够实现较高变比的升压,而 DAB 变换器具有可以进行模块化组合来提高功率传输容量和电压变比的优势<sup>[8]</sup>,因此本文选用模块化 DAB 变换器,以输入并联输出串联的方式构成 IPOS-DAB 变换器,作为系统的直流升压站。

在实际工程应用中,由于生产误差,IPOS-DAB 变换器各模块的元器件参数会存在差异,而参数的差异会引起各模块间功率不均衡,导致的端口电压、电流的不均衡会使得模块损坏的机率大大增加,极大地降低了系统的可靠性<sup>[9]</sup>。因此,在 IPOS-DAB 变换器中,控制各模块间功率均衡是保障整个系统可靠运行的关键<sup>[10]</sup>。

针对此问题,相关文献给出了一些控制策略。文献[11]提出了采用滑模控制进行 IPOS-DAB 变换器功率均衡控制,该方法具有一定的参数鲁棒性,但该方法对初始参数较为敏感。文献[12]对输入端串联输出端并联(input series output parallel, ISOP)型 DAB 变换器采用解耦控制来实现均压控制,但该方法可靠性较低,且成本较高。文献[13]采用基于占空比的模型预测控制方案对输入端串联输出端串联(input series output series, ISOS)结构的变换器输入输出电压进行均压控制。文献[14]为提高 DAB 动态控制性能提出了一种无负载电流传感器的模型预测控制方法,但并未考虑 DAB 组合变换器的均压控制。文献[15]提出一种适用于共占空比控制的基于耦合电容的 ISOP-DAB 变换器的输入电压自平衡拓扑结构,但需要额外增加器件和控制环节。文献[16]将递归最小二乘法集成到模型预测控制(model predictive control, MPC)中,提高了模型预测控制的参数鲁棒性,并对 DAB 变换器进行了实验验证。文献[17]基于主从控制,提出一种具有功率平衡控

制效果的 DAB 变换器模型预测控制策略,但该策略可靠性较低。文献[18]提出了一种基于卡尔曼滤波器的 DAB 变换器参数估计方法,用于提高 MPC 控制的参数鲁棒性,但控制系统较为复杂。文献[19]提出一种基于组合双重移相的电流应力优化控制策略来降低 DAB 输入输出电压不匹配时的电流应力,提升传输效率,但并未考虑 DAB 组合变换器的均压控制。文献[20]提出了一种串联电压外环、均压内环的双环控制策略。该策略通过外环来控制串联电压为给定值,通过内环来实现两个输出电压大小相等,但该方法相较于模型预测控制动态响应性能较低。文献[21]设计了一种新的直流变换器拓扑,提出基于矢量时间作用的预测控制策略,增强运行效率,降低电压应力,但系统拓扑结构较为复杂。文献[22]针对新能源系统低电压问题,提出高增益、高效率直流变换器,结合神经网络离线拟合 MPC 控制,提高输出电压精度,减少扰动,动态响应良好。文献[23]提出基于多变量校正控制的 MMC 预测策略及电容电压平衡方案,降低排序算法复杂度,但变量较多,控制较为复杂。文献[24]提出 IPOS-DAB 变换器电压平衡策略,采用协同三相移相实现自适应平衡。文献[25]针对 DAB-LLC 混合变换器,提出基于功率分布平衡的预测控制策略,但计算量较大,需要较高的算力。

综上所述,目前对 IPOS-DAB 变换器的功率均衡控制研究尚不完善,已有均压控制策略均存在不同方面的缺点<sup>[26]</sup>。MPC 作为一种高性能控制方法,对参数扰动具有鲁棒性,响应速度快,同时能够实现功率均衡控制,具备传统均压控制所没有的优势。近年来在各种功率变换器中得到了广泛的应用<sup>[27]</sup>。

因此本文以模型预测控制方法为基础,针对对 IPOS-DAB 变换器参数存在差异情况导致模块输出电压不均衡的问题,建立了 IPOS-DAB 的预测模型并提出了基于模型预测控制的 IPOS-DAB 均压控制策略。并在 Matlab/Simulink 中建立系统仿真模型进行功率平衡控制对比仿真试验,以验证所提控制策略的有效性。

## 1 IPOS-DAB 变换器数学模型

### 1.1 DAB 变换器拓扑结构及工作原理

DAB 因具有拓扑结构对称、可以实现功率的双向传输、通过模块化串并联组合能提升传输功率等级、降低开关器件的电压和电流应力、提高系统的运行可靠性的优点,被选择作为全直流风电系统的直流升压变换器。DAB 变换器拓扑结构如图 1 所示。由图 1 中可以看出,DAB 变换器主要由两个有源全

桥和一个高频交流变压器构成,  $V_{in}$  和  $V_o$  分别为 DAB 变换器输入、输出端口电压,  $I_{in}$  和  $I_o$  分别为输入、输出端口电流,  $V_1$ 、 $V_2$  分别为左、右全桥各自桥臂中点间电压,  $C_{in}$  和  $C_o$  分别为输入电容和输出电容,  $L$  为输入端电感,  $I_L$  为流经电感的电流, Load 为直流侧负载,  $1:n$  为变压器原副边匝数比,  $S_1—S_8$  为桥臂 IGBT 开关管开关驱动信号。

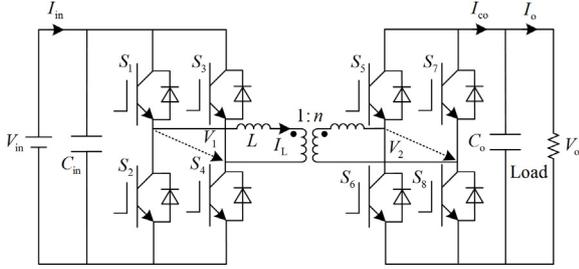


图 1 DAB 拓扑结构图

Fig. 1 DAB topology diagram

根据控制变量的个数, DAB 变换器移相控制分为单重移相控制(single phase shifting, SPS)、扩展移相控制(extended phase shifting, EPS)、双重移相控制(dual phase shifting, DPS)和三重移相控制(triple phase shifting, TPS)。SPS 是指保持两个桥内移相比为 1, 仅通过改变两桥间移相比  $D$  的大小和正负, 来对 DAB 传输功率的大小和方向进行控制。SPS 的优点是控制简单, 由于 SPS 调制是 DAB 变换器中最基本、应用最广泛的调制方案, 因此本文以此为基础进行研究。

单重移相控制时 DAB 变换器开关管驱动信号及对应参数变化波形如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 对角 IGBT 驱动信号相同, 同桥臂 IGBT 驱动信号相反,  $U_L$  为电感电压,  $T_s$  为控制周期,  $D$  为两全桥间半个周期的移相比,  $DT_s/2$  为半个周期内两全桥间相同对角位置的 IGBT 驱动信号时间差。

当全桥间移相比  $0 \leq D \leq 1$  时, DAB 变换器将会正向传输功率。当  $-1 \leq D < 0$  时, DAB 变换器将会反向传输功率。桥间驱动信号相位差会使得两全桥输出电压  $V_1$ 、 $V_2$  存在相位差, 功率传输方向是从输出电压相位超前的全桥流向相位滞后的全桥, 因此可通过控制移相角实现对传输功率的大小和流向的控制。

### 1.2 DAB 变换器数学模型

对于 DAB 变换器, 一般会首先建立其状态空间表达式, 其一般表达式如式(1)所示。

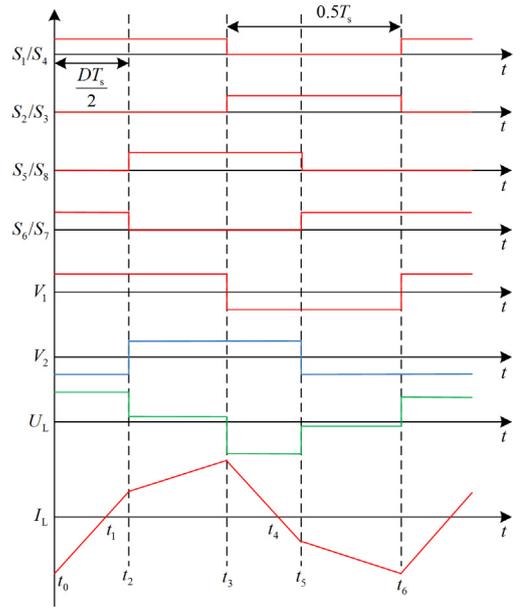


图 2 DAB 变换器 SPS 调制波形

Fig. 2 Waveforms for SPS modulation of DAB converter

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + BV_{in}(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

选择输出侧直流电压  $V_o$  和电感电流  $I_L$  作为状态变量, 可表示如式(2)所示。

$$x(t) = [I_L(t) \quad V_o(t)]^T \quad (2)$$

选择 DAB 变换器输出电压为输出变量, 即  $y(t) = V_o(t)$ , DAB 变换器的状态空间表达式各系数矩阵如式(3)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{nS_b}{L} \\ \frac{nS_b}{C_o} & -\frac{1}{RC_o} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{S_a}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1] \quad (3)$$

式中:  $n$  为变压器变比;  $S_a$ 、 $S_b$  分别表示 DAB 变换器左右双桥 IGBT 的开关状态。定义开关状态函数如式(4)所示。

$$\begin{cases} S_a = \text{sgn}(u_1) \\ S_b = \text{sgn}(u_2) \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

当 DAB 变换器采用单重移相控制并且处于正向传输电能状态时, 电感电流  $I_L$  和输出侧直流电压  $V_o$  会有 4 种不同状态, 若以 4 种不同状态下的状态空间表达式为 DAB 变换器的数学模型, 并以此进

行控制, 将会大大增加控制的复杂程度<sup>[28]</sup>, 因此为方便开展后续控制以及精简表达, 将 4 种不同状态下的状态空间表达式进行平均化处理, 得到 DAB 变换器的状态空间平均模型如式(6)所示。

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{1}{RC_o}V_o + \frac{nT_s V_{in} D(1-D)}{2LC_o} \quad (6)$$

### 1.3 IPOS-DAB 变换器数学模型

IPOS-DAB 变换器拓扑结构如图 3 所示, 由  $N$  个 DAB 子模块经输入端口并联、输出端口串联形成, 以此提高其输送容量及电压变比, 低压侧接入机侧整流器, 高压侧接入直流输电线路。

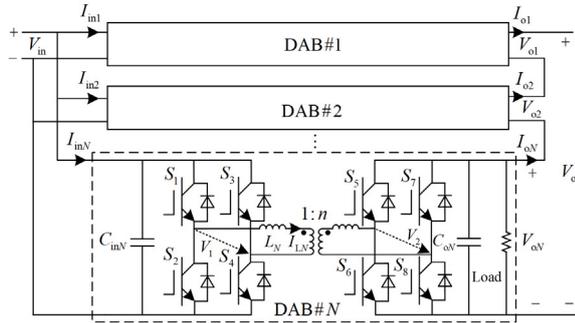


图 3 IPOS-DAB 变换器拓扑结构图

Fig. 3 IPOS-DAB converter topology diagram

图 3 中:  $V_{in}$  为 IPOS-DAB 直流升压变换器并联输入端直流电压;  $V_o$  为串联输出端直流电压;  $V_{oN}$  为第  $N$  个 DAB 模块的直流输出电压;  $I_{inN}$ 、 $I_{oN}$  分别为第  $N$  个 DAB 模块的输入电流和输出电流;  $C_{inN}$ 、 $C_{oN}$  分别为第  $N$  个 DAB 模块的输入电容及输出电容;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为 DAB 变换器原边桥臂间电压及副边桥臂间电压;  $I_{L1}$  为第  $N$  个 DAB 模块的电感电流; Load 为输出侧负载。

由于 IPOS-DAB 变换器是由 DAB 变换器子模块输入端并联输出端串联组合构成, 因此对 IPOS-DAB 变换器进行模型建立时, 可以将 DAB 变换器子模块数学模型进行聚合。数学模型可表示如式(7)所示。

$$\begin{cases} \frac{dV_{o1}}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_{o1}}V_{o1} + \frac{nT_s V_{in1} D_1(1-D_1)}{2L_1 C_{o1}} \\ \frac{dV_{o2}}{dt} = -\frac{1}{R_2 C_{o2}}V_{o2} + \frac{nT_s V_{in2} D_2(1-D_2)}{2L_2 C_{o2}} \\ \vdots \\ \frac{dV_{oN}}{dt} = -\frac{1}{R_N C_{oN}}V_{oN} + \frac{nT_s V_{inN} D_N(1-D_N)}{2L_N C_{oN}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $V_{inN}$ 、 $V_{oN}$  分别为第  $N$  个 DAB 模块的输入和

输出电压;  $R_N$ 、 $L_N$ 、 $C_{oN}$  分别为第  $N$  个 DAB 模块的电阻、电感及输出电容;  $D_N$  为第  $N$  个 DAB 模块的移相比。

## 2 基于模型预测控制的 IPOS-DAB 变换器均压控制策略

### 2.1 IPOS-DAB 变换器均压控制原理

由于本文是理论仿真验证性研究, 为方便分析验证, 本文对结构最简单的双子模块 IPOS-DAB 变换器开展研究。其拓扑结构图如图 4 所示。

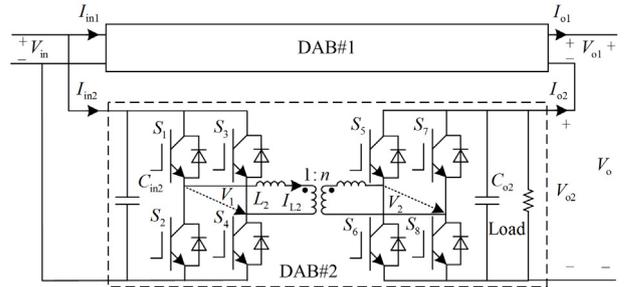


图 4 双子模块 IPOS-DAB 变换器拓扑结构图

Fig. 4 Topology diagram of twin-submodule IPOS-DAB converter

假设 DAB 变换器模块的传输效率均为 100%, 可得

$$\begin{cases} V_{in} I_{in1} = V_{o1} I_{o1} \\ V_{in} I_{in2} = V_{o2} I_{o2} \end{cases} \quad (8)$$

根据图 4 所示的输入并联输出串联的 IPOS-DAB 变换器拓扑图可知, 升压变换器中各 DAB 子模块输入侧电压自然相等, 输出侧电流自然相等, 即  $V_{in1} = V_{in2} = V_{in}$ 、 $I_{o1} = I_{o2}$ , 结合式(8)分析可知, IPOS-DAB 直流升压变换器的均压控制方法有两种, 方法一是控制子模块输入侧电流相等, 即  $I_{in1} = I_{in2}$ , 此时子模块输入侧功率均衡, 且子模块输出侧电流相等, 理想情况下, 子模块输出侧电压达到相等; 方法二是直接控制子模块输出侧电压相等, 即  $V_{o1} = V_{o2}$ , 此时子模块输出侧功率均衡, 且输入侧电流也会相等。

实际上 IPOS-DAB 直流升压变换器的各子模块的参数以及传输效率无法完全一致, 所以当采用方法一进行均压控制时, 即使通过控制使得子模块输入侧电流相等, 但由于子模块器件参数差异以及传输效率的不一致, 输出侧电流无法完全相等, 输出侧电压自然也无法相等。因此本节选用方法二进行 IPOS-DAB 直流升压变换器的均压控制。

### 2.2 MPC 预测模型

构建基于 MPC 的 IPOS-DAB 变换器均压控制

策略,首先需要建立 IPOS-DAB 变换器的离散化预测模型,本节采用一阶前向欧拉法对 IPOS-DAB 直流升压变换器的数学模型进行离散化处理,离散化公式如式(9)所示。

$$\frac{dV_o}{dt} \approx \frac{V_o^{k+1} - V_o^k}{T_s} \quad (9)$$

式中:  $V_o^{k+1}$  为下一时刻 DAB 模块输出电压采样值;  $V_o^k$  为当前时刻 DAB 模块输出电压采样值。

针对每个 DAB 模块独立进行移相比计算,以此克服共移相比控制方法出现的功率不均衡问题以及传统均压控制策略存在的不足,提高系统稳定运行可靠性。IPOS-DAB 变换器输出端的电压-电流关系可表示为式(10)。

$$\begin{cases} C_{oi} \frac{dV_{oi}}{dt} = I_{co_i} - I_{oi} = \frac{nV_{in}}{2f_s L_i} D_i (1 - |D_i|) - I_{oi} \\ \sum_{i=1}^N V_{oi} = V_o \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $I_{co_i}$ 、 $f_s$ 、 $D_i$  分别为第  $i$  个 DAB 模块的输出电容电流、开关频率和移相比。将式(10)在一个开关周期内离散化,得到第  $i$  个模块输出电压预测值为

$$V_{oi}^{k+1} = V_{oi}^k + \frac{nV_{in} T_s^2}{2L_i C_{oi}} D_i \left( 1 - |D_i| - \frac{T_s I_{oi}(k)}{C_{oi}} \right), \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

式中,  $V_{in}^k$ 、 $V_{oi}^k$  分别为第  $i$  个 DAB 模块  $k$  时刻的输入电压与输出电压。式(11)即为所求 IPOS-DAB 变换器预测模型。

### 2.3 MPC 代价函数

对于 IPOS-DAB 直流升压变换器,功率平衡只需控制输出侧电压相等即可平衡,通过跟踪平均输出电压基准来控制每个模块的输出电压。即对于 IPOS-DAB 直流升压变换器,其子模块输出电压均衡应当满足式(12)。

$$\begin{cases} V_{o1} = V_{o2} = V_{o3} = \dots = V_{oN} = V_o^{aver} \\ V_o^{aver} = \frac{V_o}{N} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $V_o^{aver}$  为  $N$  个 DAB 子模块的平均输出电压。为实现 IPOS-DAB 变换器的连续控制集模型预测控制(continuous control set-model predictive control, CCS-MPC),下一步需要建立相应的代价函数来评估控制参数的优劣。本节选用 DAB 变换器子模块的输出电压与输出电压平均值差的平方为代价函数,如式(13)所示。

$$J_{V_{oi}} = (V_{oi}^{k+1} - V_o^{aver})^2 \quad (13)$$

最优控制量计算式的推导,可视为在一定不等式约束下的函数极值寻找过程,并可通过相应数学形式来描述,如式(14)所示。

$$\begin{cases} D_i = \arg(\min J) \\ \text{s.t.} -0.5 \leq D_i(k) \leq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

当 IPOS-DAB 变换器正向传输功率时,最优移相比  $D_i$  计算公式如式(15)所示。

$$\begin{cases} D_i = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\alpha_i}}{2}, & 1 - \sqrt{1 - 4\alpha_i} \geq 0 \\ 0, & 1 - \sqrt{1 - 4\alpha_i} < 0 \\ 0.5, & 4\alpha_i < 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中:

$$\alpha_i = \frac{2f_s^2 C_{oi}}{nV_{in}^k} \left( \frac{1}{N} V_o - V_{oi}(k) + \frac{I_{oi}^k}{C_{oi} f_s} \right) \quad (16)$$

式中,  $I_{oi}^k$  是  $k$  时刻第  $i$  个 DAB 模块的输出电流。

### 2.4 控制策略实现

基于 MPC 的 IPOS-DAB 变换器均压控制框图如图 5 所示。首先对每个 DAB 变换器子模块进行数据采集,传递至对应预测模型,通过预测模型计算出的预测值将会传递至代价函数计算中心,以代价函数最小化计算原则计算出最优移相比  $D_i$ ,并将此移相比通过单重移相控制原理生成对应驱动信号对 DAB 模块进行控制。在每个采样周期循环滚动此过程,从而达到对 IPOS-DAB 直流升压变换器各子模块的功率均衡控制。

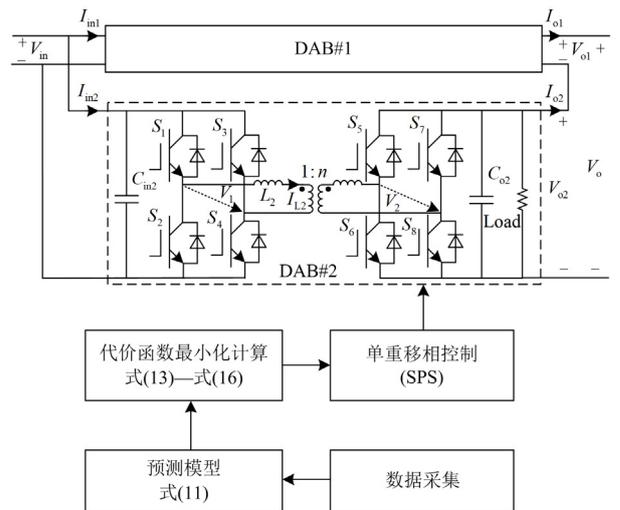


图 5 基于 MPC 的均压控制策略结构图

Fig. 5 Structure of MPC-based voltage equalization control strategy

### 3 仿真验证

为验证所提均压控制策略的静态性能和动态性能, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 6 所示的全直流风电系统模型, 设置 3 种工况进行仿真验证, 分别是风功率稳定工况、风功率大幅波动工况和短时故障工况。

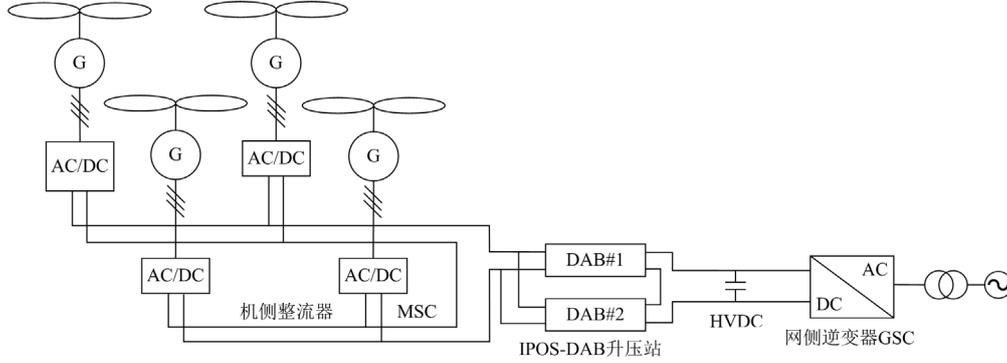


图 6 全直流风电系统仿真模型结构图

Fig. 6 Simulation model structure of all-DC wind power system

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

参数	数值
风电场额定功率 $P/MW$	$2 \times 4$
定子等效电阻 $R_s/m\Omega$	0.8
定子等效电感 $L_s/mH$	1.57
机侧整流直流电压 $V_{dc}/kV$	$\pm 1.2$
DAB1 输入端电感 $L_1/mH$	0.11
DAB2 输入端电感 $L_2/mH$	0.09
DAB1 输出端电容 $C_{o1}/\mu F$	110
DAB2 输出端电容 $C_{o2}/\mu F$	90
升压站低压侧额定电压 $u_{vdc}^*/kV$	$\pm 2.4$
升压站高压侧额定电压 $u_{vdc}^*/kV$	$\pm 35$
直流电容 $C/\mu F$	100
网侧电阻 $R_g/\Omega$	0.1
网侧电感 $L_g/mH$	0.003
采样周期 $T_s/\mu s$	10

根据 IPOS-DAB 变换器功率控制原则, 输出功率波形与电压波形基本一致, 由于 DAB 子模块输入端并联, 端口电压相等, 因此本文对比分析传统移相控制与模型预测控制下的 DAB 模块输入功率以及模块端口输出电压。

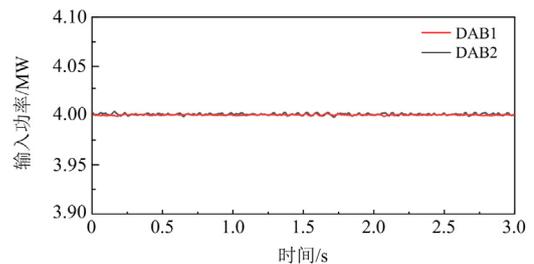
#### 3.1 风功率稳定工况

设定系统中风机在 12 m/s 的额定风速稳定运行, 此时风功率稳定, 在此工况下, 对比分析传统移相控制与模型预测控制下的 DAB 模块端口输出

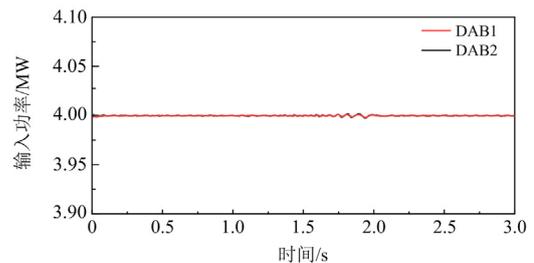
为验证由于系统直流升压站中 DAB 模块参数差异导致的功率不均衡, 所以设定系统仿真参数如表 1 所示, 根据式(9), 设定 DAB 模块输入端电感与设定参数值 0.1 mH 不一致, 输出端电容参数与设定参数值 100  $\mu F$  不一致, 两模块之间也存在参数误差, 以此拟合实际情况, 开展仿真试验。

电压与输入功率。

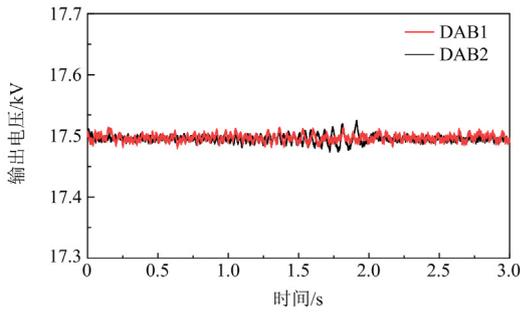
风功率稳定时不同控制方法下 IPOS-DAB 变换器子模块输入功率及输出电压如图 7 所示。由图 7(a)、图 7(b)可以看出, 所提控制策略能够将 DAB 模块输入功率波动均值控制在 0.02 MW。且相比于传统均压控制策略, 采用所提控制策略时, 不同模块功率偏差较小, 输入功率一致性更好, 这是因为所提控制策略具有良好的输出功率均衡控制能力, 使得模块输入功率一致性变得更好, 达到了预期控制目标。



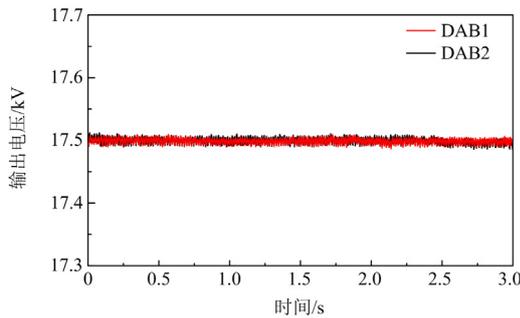
(a) 传统移相控制下 DAB 子模块输入功率



(b) 模型预测控制下 DAB 子模块输入功率



(c) 传统移相控制下DAB子模块输出电压



(d) 模型预测控制下DAB子模块输出电压

图7 风功率稳定时不同控制方法下 IPOS-DAB 变换器子模块输入功率及输出电压

Fig. 7 Input power and output voltage of IPOS-DAB converter submodule with different control methods during wind power stabilization

如图 7(c)、图 7(d)所示，在风功率稳定工况，采用传统均压控制策略时，DAB 子模块电压波动均值约为 0.025 kV，采用本文所提出的均压控制策略，DAB 子模块电压波动均值约为 0.02 kV，由此可见采用所提策略时，DAB 子模块输出电压一致性优于传统均压控制策略，且电压波形畸变率更小。证明所提策略在额定风功率稳定工况下具有良好的功率均衡控制能力与静态性能。

### 3.2 风功率波动工况

为验证所提均压控制策略在风功率波动工况下的动态性能，由于风机在大于额定风速时，输出功率会稳定不变，因此设定风机在低于额定风速的工况下进行仿真试验，以此验证所提均压控制策略在风功率波动工况下的控制性能。风速变化曲线如图 8 所示。

风功率波动时不同控制方法下 IPOS-DAB 变换器子模块输入功率及输出电压如图 9 所示。由图 9(a)、图 9(b)可以看出，在风功率波动工况下，风机输入功率有明显波动，相比于传统移相控制，采用模型预测控制均压控制策略能够使得 DAB 子模

块输入功率即风机输出功率波动更小，功率分布更加均衡，相比于风功率稳定工况，在风功率波动工况更能体现所提均压控制策略对输入端功率均衡分布的正面影响，验证了所提控制策略在风功率波动工况下具有良好的功率均衡控制效果，且相比于传统移相控制，控制效果更好。

风功率波动时不同控制方法下升压站 DAB 子模块输出电压如图 9(c)、图 9(d)所示。可以看出，风速

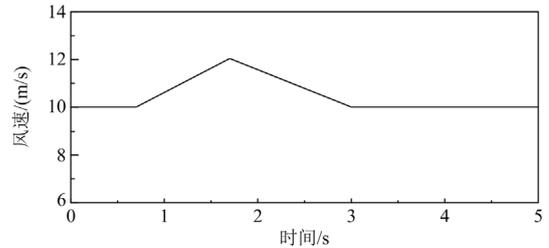
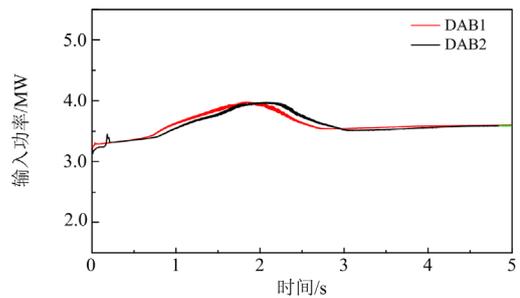
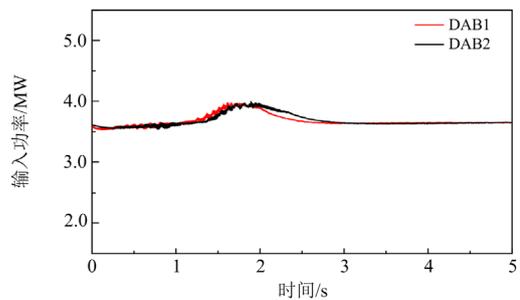


图8 风速变化曲线

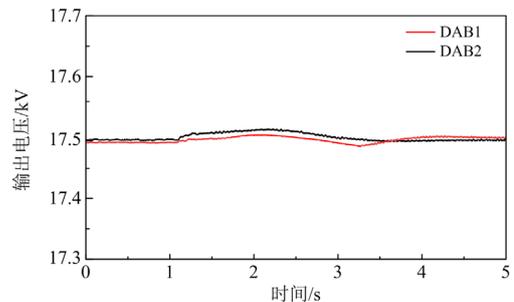
Fig. 8 Wind speed change curve



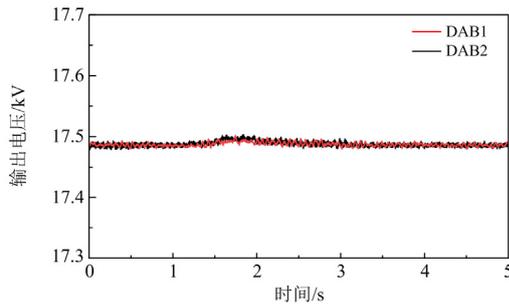
(a) 传统移相控制下DAB子模块输入功率



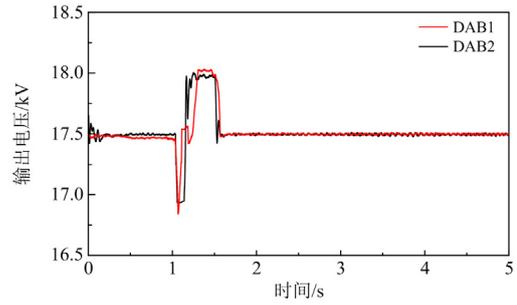
(b) 模型预测控制下DAB子模块输入功率



(c) 传统移相控制下DAB子模块输出电压



(d) 模型预测控制下DAB子模块输出电压



(c) 传统移相控制下DAB子模块输出电压

图9 风功率波动时不同控制方法下 IPOS-DAB 变换器子模块输入功率及输出电压

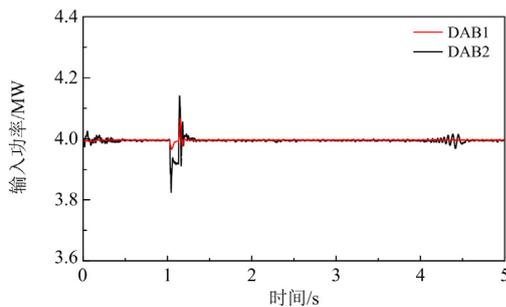
Fig. 9 Input power and output voltage of IPOS-DAB converter submodule under different control methods during wind power fluctuation

波动对模块输出电压有一定影响,但两种控制方法均能将电压控制在合理区间,相比于传统移相控制,基于模型预测控制方法的均压控制策略能够使得系统直流升压站 DAB 子模块输出电压更加一致,减少了由于电压不平衡导致器件损坏、进而降低系统可靠性的概率。

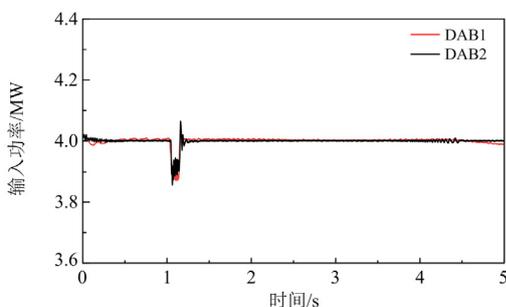
### 3.3 短时故障工况

为验证所提策略在故障工况下的动态控制效果,在仿真系统设置系统并网点相间短路故障,1.0 s 故障发生,1.1 s 故障切除。短时故障时不同控制方法下升压站 DAB 子模块输入功率及输出电压如图 10 所示。

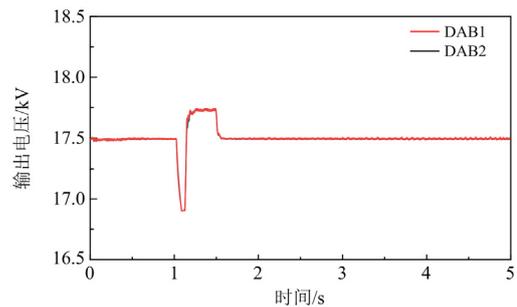
由图 10(a)、图 10(b)可知,在故障工况下,升压



(a) 传统移相控制下DAB子模块输入功率



(b) 模型预测控制下DAB子模块输入功率



(d) 模型预测控制下DAB子模块输出电压

图10 短时故障时不同控制方法下 IPOS-DAB 变换器子模块输入功率及输出电压

Fig. 10 Input power and output voltage of IPOS-DAB converter submodule under different control methods during short-time failure

站 DAB 子模块输出电压有较大幅度波动,但采用本文所提控制策略相较于传统均压控制,电压波动幅度更小,传统均压控制电压波动幅值约为 1.1 kV,所提控制策略电压波动幅值约为 0.85 kV,且 DAB 子模块输出电压一致性显著优于传统均压控制,说明本文所提控制策略在故障工况下同样具有良好的均压控制效果,能够满足系统在故障工况下的功率均衡控制要求,减小了在故障工况下功率不平衡导致的器件损坏概率,提高了系统稳定运行的可靠性。

由图 10(c)、图 10(d)可以看出,使用所提控制策略会对故障时的模块输入功率有所优化,传统均压控制功率波动约为 0.3 MW,所提均压控制策略功率波动约为 0.2 MW,且对比分析可以发现,在 1.1 s 故障结束后,传统均压控制在 1.3 s 故障恢复,所提控制策略在 1.2 s 故障恢复,输入侧功率能够提前 0.1 s 恢复稳态,证明了采用所提模型预测均压控制策略能够提高系统的故障恢复能力,具有良好的动态性能。

## 4 结论与展望

本文针对全直流风电系统中 IPOS 结构双有源

桥 DC-DC 变换器采用传统移相控制进行 DAB 均压控制时存在的问题, 采用了基于模型预测控制的 IPOS 结构双有源桥 DC-DC 变换器均压控制策略, 相比于普通移相控制, 简化了控制结构, 在优化均压控制效果的同时, 提高了系统动态响应速度。在风功率稳定工况、风功率波动工况以及故障工况下仿真对比分析升压站 DAB 子模块输出电压及输入功率, 根据仿真试验结果, 所提控制策略在 3 种常见工况下均具有良好的均压控制效果, 且相比于传统移相控制, 该控制策略具有更好的动态响应速度及控制精度, 能够改善全直流风电系统面对非正常运行工况时, 风电场 IPOS-DAB 结构直流升压站 DAB 子模块输出电压不均衡导致系统可靠性下降的问题。

### 参考文献

- [1] 王祥君, 李战龙, 王海云, 等. 基于新型直流风电机组的串联型全直流发电系统设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 178-187.  
WANG Xiangjun, LI Zhanlong, WANG Haiyun, et al. Design and research of a series all-DC power generation system based on a new DC wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 178-187.
- [2] 李战龙, 王祥君, 王海云, 等. 基于直流风电机组的风电全直流输电系统综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 14-24.  
LI Zhanlong, WANG Xiangjun, WANG Haiyun, et al. Review of wind power ALL-DC transmission system based on DC wind turbine[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 14-24.
- [3] 汝冬, 蔺红. 改善惯性响应与一次调频的风电全直流系统协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 52-62.  
RU Dong, LIN Hong. Coordinated control strategy for improving inertial response and primary frequency modulation in wind power full DC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 52-62.
- [4] 郭灵瑜, 姚钢, 周荔丹. 全直流海上风电场高升压比 DC/DC 变换技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 158-169.  
GUO Lingyu, YAO Gang, ZHOU Lidan. Research review on high step-up ratio DC/DC converter for offshore DC wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 158-169.
- [5] 刘其辉, 樊双婕, 洪诚程, 等. 采用复合模块化结构的海上风电送出直流变换器[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 142-151.  
LIU Qihui, FAN Shuangjie, HONG Chengcheng, et al. DC/DC converter for offshore wind power transmission using composite modular structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 142-151.
- [6] 张灿, 吕世轩, 胡润泽, 等. 输入串联输出并联型双有源全桥 DC-DC 变换器模型预测控制方法[J]. 电力建设, 2024, 45(3): 87-96.  
ZHANG Can, LÜ Shixuan, HU Runze, et al. Research on model predictive control method for input-series output-parallel dual-active full-bridge DC-DC converter[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 87-96.
- [7] 吕世轩, 王俊尧, 郑丽君. 基于扩展移相的双有源桥变换器复合优化控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(8): 128-140.  
LÜ Shixuan, WANG Junyao, ZHENG Lijun. Compounded optimization of dual active bridge converter based on extended phase shift[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 128-140.
- [8] 赵彪, 安峰, 宋强, 等. 双有源桥式直流变压器发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 288-298.  
ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Development and application of DC transformer based on dual-active-bridge[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 288-298.
- [9] WANG P, ZHOU L, ZHANG Y, et al. Input-parallel output-series DC-DC boost converter with a wide input voltage range, for fuel cell vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 7771-7781.
- [10] 王莉. 双有源桥变换器的优化控制与模块化均压控制策略研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.  
WANG Li. Research on optimal control and modular voltage equalization control strategy of dual active bridge converter[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [11] LEE S M, JEUNG Y C, LEE D C. Voltage balancing control of IPOS modular dual active bridge DC/DC converters based on hierarchical sliding mode control[J]. IEEE Access, 2019, 7: 9989-9997.
- [12] ZUMEL P, ORTEGA L, LÁZARO A, et al. Modular dual-active bridge converter architecture[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2444-2455.
- [13] WEI Q, WU B, XU W D, et al. Model predictive control of capacitor voltage balancing for cascaded modular DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(1): 752-761.
- [14] DENG Y, SONG W S, YIN S, et al. A model predictive control scheme without current sensor of dual active bridge DC-DC converters: improving dynamic performance and reducing hardware cost[J]. IEEE Transactions on

- Transportation Electrification, 2022, 38(9): 10880-10894.
- [15] 范恩泽, 赵鲁, 李耀华, 等. 一种输入串联输出并联双有源桥变换器输入电压自平衡结构[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 141-150.  
FAN Enze, ZHAO Lu, LI Yaohua, et al. A structure with IVS self-balancing for an ISOP-DAB converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 141-150.
- [16] LI X, ZHENG D, CAO Y, et al. Model predictive control with parameter identification for multi-dual-active-bridge converters achieving accurate power balancing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 10880-10894.
- [17] HU L, K LI, ZHOU L M. Cooperative predictive control with power-balancing for multi-parallel DAB converters[C]//2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), November 4-7, 2022, Guangzhou, China: 232-236.
- [18] LI Y, SAHOO S, DRAGIĆEVIĆ T, et al. A model predictive control based power sharing control of dual active bridge converter with parameters estimation[C]//IECON 2022-48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 17-20, 2022, Brussels, Belgium: 1-6.
- [19] 余伟臣. 双有源桥 DC/DC 变换器电流应力优化控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.  
YU Weichen. Research on current stress optimization control strategy for dual active bridge DC/DC converter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [20] 孙传财. 双有源全桥 DC-DC 变换器及其串联均压控制技术[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.  
SUN Chuancai. Research on dual-source full-bridge DC-DC converter and its series voltage equalization control technology[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [21] 汪诚, 张善路, 张佳琪, 等. 一种单输入双输出高增益 DC-DC 变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 44-58.  
WANG Cheng, ZHANG Shanlu, ZHANG Jiaqi, et al. A single input dual output high step-up DC-DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 44-58.
- [22] 罗朋, 樊涵宇, 梁剑鑫, 等. 基于神经网络拟合显式 MPC 的高增益直流变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 47-61.  
LUO Peng, FAN Hanyu, LIANG Jianxin, et al. High gain DC converter based on a neural network fitting explicit MPC[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 47-61.
- [23] 冯海博, 杨兴武, 刘海波, 等. 基于多变量校正的 MMC 快速有限集模型预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 26-36.  
FENG Haibo, YANG Xingwu, LIU Haibo, et al. Finite control set model predictive control strategy for an MMC based on multi-variable fast adjusting[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 26-36.
- [24] ZHANG C, ZHOU Y, ZHAO Y S, et al. Self-adapting voltage balancing method for IPOS dual active bridge converter with CTPS control[C]//2023 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), October 27-29, 2023, Tianjin, China: 1-3.
- [25] HAN X, LIAO Y F, YANG D. Model predictive control strategy for DAB-LLC hybrid bidirectional converter based on power distribution balance[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(6): 3236-3240.
- [26] 李鑫, 朱浩宇, 邱亚, 等. 独立输入并联输出模块化 DAB 变换器功率均衡优化控制[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 1-8.  
LI Xin, ZHU Haoyu, QIU Ya, et al. Power equalization optimization control of input independent output parallel modular DAB converter[J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 1-8.
- [27] BABQI, A, ALAMRI B. A comprehensive comparison between finite control set model predictive control and classical proportional-integral control for grid-tied power electronics devices[J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2021, 18(7): 67-87.
- [28] LI Z, ZHANG Y, LIU J J, et al. A second-harmonic suppression method based on differentiated-capacitance design for input-parallel output-series DAB fed single-phase VSI[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 11592-11606.

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-05-18

作者简介:

马智(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电系统稳定控制; E-mail: 964925274@qq.com

蔺红(1969—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定控制。E-mail: xjulh69@163.com

(编辑 魏小丽)