

引用格式:李涛,关维德,王旭红,等.基于输入均压与虚拟直流电机相结合的直流电路由器控制策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):253-263.

Citation: LI Tao, GUAN Weide, WANG Xuhong, et al. DC electric energy router control strategy combining the input voltage sharing and virtual DC machine[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 253-263.

# 基于输入均压与虚拟直流电机相结合的 直流电路由器控制策略

李 涛<sup>1</sup>, 关维德<sup>1</sup>, 王旭红<sup>1</sup>, 夏向阳<sup>1</sup>, 杨 昀<sup>2</sup>, 钟 健<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力公司株洲供电分公司, 湖南 株洲 412000)

**摘 要:**针对中压直流配电网接入下的直流电路由器在新能源出力等工况下,使用传统控制策略对直流母线的控制效果一般、电压易越限等问题,基于模块化的输入串联输出并联(input-series output-parallel, ISOP)型拓扑结构,提出一种基于输入均压与虚拟直流电机相结合的直流电路由器控制策略。首先,研究输入均压控制过程中模块间的功率均衡控制特性并与输出均流控制进行比较;接着,将虚拟直流电机控制应用到控制算法中,使变流器模拟出直流电机的惯性特性;然后,对虚拟直流电机建立小信号数学模型,分析其工作机理以及参数对系统的影响;最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型进行验证。结果表明:所提控制策略能够在实现直流电路由器各模块间功率均衡的同时,具有类似直流电机的惯量特性与阻尼特性,可显著提高直流配电网直流母线电压稳定性。

**关 键 词:**直流电路由器;直流配电网;输入均压;虚拟直流电机;直流母线电压

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.027 **中图分类号:** TM46 **文章编号:** 1673-9140(2024)03-0253-11

## DC electric energy router control strategy combining the input voltage sharing and virtual DC machine

LI Tao<sup>1</sup>, GUAN Weide<sup>1</sup>, WANG Xuhong<sup>1</sup>, XIA Xiangyang<sup>1</sup>, YANG Yun<sup>2</sup>, ZHONG Jian<sup>1</sup>

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Zhuzhou Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power, Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**Abstract:** For at the DC electric energy router in the MVDC distribution network, there are some issues when renewable energy sources fluctuate. Under these conditions, the traditional control strategy has a general control effect on the DC bus and the voltage is easy to violate. Based on the modular input-series-output-parallel (ISOP) type topology, a DC electric energy router control strategy combining the input voltage sharing and virtual DC machine is proposed. First, the power balancing control characteristics between the modules in the input voltage sharing control process are studied and compared with the output current sharing control; then, the virtual DC machine control is applied to the control algorithm so that the converter can simulate the inertia characteristics of DC machine; then, a small signal model of the virtual DC machine is established to analyze its working principle and the influence of parameters on the system. Finally, a simulation model is built in MATLAB/Simulink for verification. The results show that the proposed control strategy can achieve power balancing among the modules of the DC electric energy router while having inertia characteristics and damping characteristics similar to the DC machine, which can significantly improve the DC bus voltage stability of the DC distribution network.

**Key words:** DC electric energy router; DC distribution network; input voltage sharing; virtual DC machine; DC bus voltage

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51977014); 湖南省教育厅科学研究项目(22A0213)

通信作者: 关维德(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力电子与新能源发电技术研究; E-mail: guanweide@csust.edu.cn

受能源短缺以及环境污染等问题的影响,分布式新能源及储能在配电网中的占比逐渐提升<sup>[1-8]</sup>,传统电网无法满足分布式新能源及储能接入的需求。为解决该问题,传统电网开始向能源互联网过渡与发展<sup>[9-11]</sup>。其中,基于电力电子技术的电能路由器(electric energy router, EER)作为能源互联网的关键设备,具有以下特点<sup>[12-13]</sup>:能够实现多能源互联、能量双向流动;适应新能源出力不稳定等负面影响,满足不同电压等级需求;各端口可根据接入设备的不同工作在多种工作模式下,能够有效提高配电网的兼容性与经济性。其拓扑结构与运行控制具有重要的研究价值及应用前景。

在交流配电网中,交流电能路由器输入侧先采用AC/DC变流器进行整流,再接入DC/DC变换器来适配其他电压等级电网的接入,但由于交流配电网固有的相位及频率带来的无功补偿及谐波等问题,会对电能质量带来不可避免的影响,交流配电网的不利影响日趋明显。随着时代的发展,配电网供电半径逐年扩大,新能源发电和用户侧使用直流电或含有直流环节的部分迅速增长,以及直流输电的广泛应用,直流配电网得到了越来越多的关注与重视<sup>[14-21]</sup>。直流电能路由器无须考虑交流配电网接入带来的同步问题,省去了交流电能路由器的整流环节,减少了设备的投资与损耗,具有很大的发展前景。

目前,针对直流电能路由器的研究只有少量成果。文献[22]对一种H桥直流电能路由器的工作原理进行了分析,但其拓扑和控制策略较为简单,控制精度不高。文献[23]采用三有源桥拓扑结构,并提出一种基于下垂移相的功率协调控制策略,减小了各端口母线电压偏差的同时,能对故障电网提供一定的功率支撑。文献[24]提出一种级联高频变压器的多端口拓扑,各个端口间相互独立,实现了故障隔离,提高了系统的稳定性。上述文献对直流电能路由器拓扑及控制的研究都基于低压、低功率的直流微电网场景。

对于中高压配网的接入场景,文献[25]采用串入并出型结构,实现了中高压直流配网与低压直流微网间的能量变换,采用输入均压环实现各模块输入电压的平衡以达到功率均衡的目的。文献[26]将各变换器输出功率与参考功率作为功率环的输入,以实现各模块间的功率均衡。文献[27]采用串入串出与串入并出混联结构,增加了多种电压等级

电网接入的灵活性。文献[28]利用级联模块间的能量关系实现了用于级联模块的均压控制器,并提出了一种基于能量平衡关系的电能路由器并网运行综合控制策略。上述文献采用的方法对直流母线电压的控制较简单,且没有考虑电力电子变压器的快速性所带来的无惯量问题。值得借鉴的是,文献[29-30]将虚拟电机技术应用在能量路由器中,解决了电力电子变压器的快速性所带来的无惯量问题,提高了直流母线电压的稳定性,但均只在单模块DC/DC变换器中得到验证,在多模块DC/DC变换器中的应用尚待研究,且未分析参数变化对系统性能的影响。

基于上述文献,本文采用基于双有源桥(dual active bridge, DAB)的输入串联输出并联(input-series output-parallel, ISOP)模块化拓扑,实现中压直流配网与直流微电网间的能量变换,并提出一种输入均压(input voltage sharing, IVS)与虚拟直流电机(virtual DC machine, VDCM)相结合的控制策略,即IVS+VDCM控制策略。该控制策略在实现直流电能路由器中多个模块间功率均衡的同时,提高了直流母线电压的稳定性;然后,建立小信号模型,分析VDCM参数对系统的影响,最后,将IVS+VDCM控制策略与共同移相比控制在新能源波动、负载突变以及储能投切3种工况下进行仿真对比分析,验证其对能量流动与平衡、直流母线电压的稳定性影响,仿真结果表明了所提控制策略的有效性。

## 1 直流电能路由器结构

本文采用的直流电能路由器由直流输入端口、光伏发电端口、储能电池端口及交直流负载端口组成,其拓扑结构如图1所示。

### 1) 直流输入端口。

直流输入端口采用DAB DC/DC变换器,该变换器因其具有电气隔离、易实现软开关等特点,在直流配电网中被广泛应用<sup>[31-33]</sup>。由于DAB输入侧电压等级较大、功率等级较高,单个DAB容量有限,难以满足系统需求。为此,采用串联输入并联输出型模块化串并联组合,提高功率容量,能够适用于中压功率变换的场合。

### 2) 光伏发电端口。

光伏发电端口由升压(boost)变换器接入直流

电路由器,使光伏按照最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)理论工作在最大功率点状态。

### 3) 储能电池端口。

储能电池端口经降压—升压(buck-boost)变换器接入直流电路由器,储能电池可在光伏功率充足时消纳多余能量、光伏功率不足时补充能量,从

而实现系统的能量平衡,稳定母线电压。

### 4) 交直流负载端口。

为了提高直流电路由器的适用范围,加入交流负载端口。通过单相DC-AC变换器将来自直流母线的直流电逆变为交流电,为端口内的交流负载供电。直流负载端口与直流母线直接相连,为端口内的电动汽车等直流负载供电。

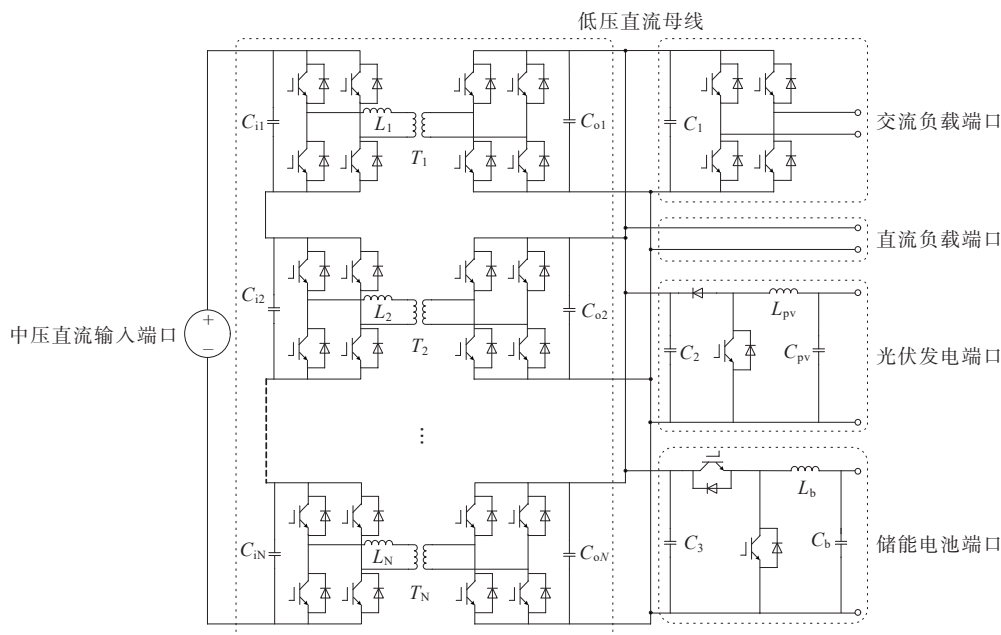


图1 直流电路由器拓扑

Figure 1 DC electric energy router topology

## 2 直流电路由器控制策略

在直流输入端口中,为了保证系统正常运行,各个DAB单元需实现功率均衡。ISOP型结构中,若每个DAB单元参数相同,采用共同移相比的单移相控制是最简单有效的,其控制框图如图2所示,由输出电压实际值与参考值作差经PI控制输出各DAB单元的移相比。

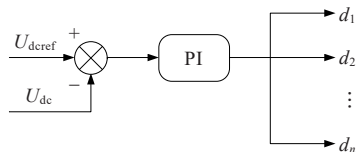


图2 共同移相比控制

Figure 2 Common phase shift ratio control

其中, $U_{dcref}$ 和 $U_{dc}$ 分别为直流母线电压的参考值与实际值, $d_1, d_2, \dots, d_n$ 分别为每个DAB变换器的移相比。

在实际工程中,每个DAB的参数难以做到完全一致,会存在一定的误差,共同移相比控制无法实现功率均衡。由于输入侧串联,各模块的输入电流相同且等于总输入电流;由于输出侧并联,各模块的输出电压相等且等于总输出电压即直流母线电压,只需实现输入均压和输出均流(output current sharing, OCS)即可满足功率均衡的要求。各模块工作在稳态时,输入电压、输出电流不变,假设变换效率为100%,则:

$$U_{in} I_{in} = U_{in} I_{in} = P_{in} = P_{on} = U_{on} I_{on} = U_o I_{on} \quad (1)$$

式中, $U_{in}, I_{in}, P_{in}$ 分别为各模块输入电压、输入电流、输入功率; $U_{on}, I_{on}, P_{on}$ 分别为各模块输出电压、输出电流、输出功率; $I_{in}, U_o$ 分别为总输入电流和总输出电压。

若采用IVS控制,则各模块输入电压相等,那么由式(1)可得各模块输出功率相等,从而得到各模块输出电流相等。同理,若采用OCS控制,可得到各模块输入电压相等,因此,稳态下只需满足输

入均压和输出均流中的一种要求即可实现各DAB单元的功率均衡。

在扰动状态下,若采用IVS控制,那么各变换器输入功率相同;假设各模块效率一致,那么输出功率也相同。由于ISOP结构下输出侧并联,输出电压相同,则输出电流也相同。因此出现扰动时,IVS仍然能够稳定运行。若采用OCS控制,假设变换器效率一致,那么输入功率也相同。以两模块ISOP结构为例,其输入侧等效示意图如图3所示,对其列写基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL)方程。其中,  $I_{in1}$ 、 $I_{in2}$  为输入电流;  $I_{c1}$ 、 $I_{c2}$  为流入电容的电流;  $I_{i1}$ 、 $I_{i2}$  为实际输入DAB变换器的电流。

$$\begin{cases} I_{c1} = I_{in1} - I_{i1} \\ I_{c2} = I_{in2} - I_{i2} \end{cases} \quad (2)$$

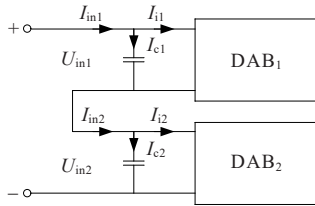


图3 ISOP输入侧等效示意图

Figure 3 Equivalent diagram of ISOP input side

若DAB<sub>1</sub>输入侧电压  $U_{in1}$  因扰动而升高,输入功率不变,则实际输入电流  $I_{i1}$  降低;与此同时DAB<sub>2</sub>输入侧电压  $U_{in2}$  降低,实际输入电流  $I_{i2}$  上升。图4给出输入侧电流与电压的关系图,2个模块的稳定工作点因  $U_{in1}$  升高使DAB<sub>1</sub>工作点由A移向至B,  $U_{in2}$  降低使DAB<sub>2</sub>工作点由A移向至C, B点  $I_{in1} > I_{i1}$ , 由式(2)得流入电容的电流  $I_{c1} > 0$ , 电容充电,  $U_{in1}$  继续上升,无法回到A点; C点  $I_{in2} < I_{i2}$ , 由式(2)得流入电容的电流  $I_{c2} < 0$ , 电容放电,  $U_{in2}$  继续下降,无法回到A点。

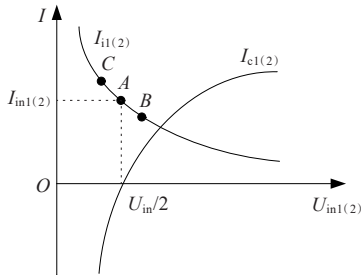


图4 ISOP输入侧电流与电压的关系

Figure 4 Relationship between ISOP input side current and voltage

因此,在扰动状态下,OCS控制不能使系统稳定,应当采用IVS控制策略,加入输入均压控制环从而实现功率均衡。为了进一步提高系统的动态特性,可以将单电压闭环替换为电压电流双闭环从而实现均压环、母线电压环、电流环为一体的三环控制,如图5所示。

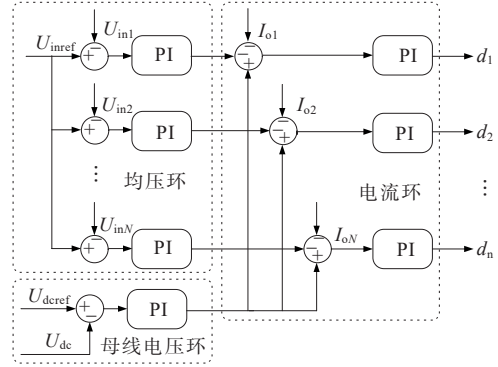


图5 三环控制

Figure 5 Three-loop control

但由于电力电子变压器本身的无惯量问题,在新能源以及负荷发生波动时,对直流母线电压稳定的效果一般。为解决该问题,可将虚拟直流电机技术应用到ISOP型直流输入端口中,使其在实现功率均衡的同时,增加直流母线电压的惯性与稳定能力。将DAB变换器等效为图6所示电路,一边接到直流电网,另一边接入直流母线,且DAB变换器母线侧电容所含能量为  $E_1 = CU_{dc}^2/2$ , 而直流电机的能量来源于转子旋转所产生的能量  $E_2 = J\omega^2/2$ , 存在对偶关系,因此虚拟直流电机控制策略的可行性得到了进一步验证。

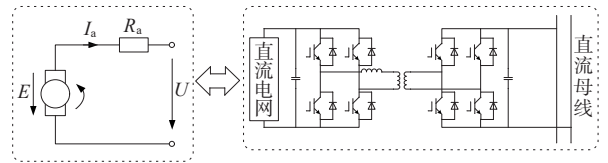


图6 虚拟直流电机模型

Figure 6 VDCM model

直流电机中电枢回路的电动势平衡方程为

$$E = U + I_a R_a \quad (3)$$

$$E = C_T \Phi \Omega \quad (4)$$

式(3)、(4)中,  $E$  为电枢绕组电动势;  $U$  为直流电机端电压;  $I_a$  为电枢电流;  $R_a$  为电枢回路的总等效电阻;  $C_T$  为转矩系数;  $\Phi$  为磁通量;  $\Omega$  为电机的角速度。

电磁功率  $P_{em}$  为



$$P_{em} = EI_a \quad (5)$$

电磁转矩  $T_{em}$  为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (6)$$

直流发电机的机械方程为

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_m - T_{em} - D(\Omega - \Omega_0) \quad (7)$$

式中,  $J$  为直流电机惯性系数;  $T_m$  为直流发电机的机械转矩;  $T_{em}$  为直流发电机的电磁转矩;  $D$  为直流发电机的阻尼系数;  $\Omega_0$  为直流发电机的额定角速度。

虚拟直流电机控制策略框图如图7(a)所示, 直流母线电压参考值  $U_{dcref}$  与实际值  $U_{dc}$  作差, 经过PI控制得到功率补偿量  $\Delta P$ , 与参考功率  $P_{ref}$  相加后除以额定角速度  $\Omega_0$  得到机械转矩  $T_m$ , 经电机电动势平衡方程与机械方程计算后得到参考电流  $I_{ref}$ , 参考功率  $P_{ref}$  的计算方法如下:

$$P_{ref} = P_{load} + P_b - P_{pv} \quad (8)$$

式中,  $P_{load}$  为负载功率;  $P_b$  为储能充电功率;  $P_{pv}$  为光伏等新能源发电功率。

将经虚拟直流电机控制输出的电流与输入均压环得到的电流修正量相结合得到总输出电流  $I_o$ , 带入电流环中即可得到DAB的移相比  $d$ , 三环控制中由于电流环的加入, 需额外增加电流传感器, 为了避免增加多个电流传感器导致的成本上升问题, 在得到  $I_o$  后, 可以通过DAB的功率传输公式直接计算出移相比, 在避免加入多个电流传感器造成成本增加的同时, 也可以减小PI调节时间对系统的影响, 进一步提高系统的动态响应速度。具体计算如下。

在DAB中, 若不考虑功率损耗, 单移相控制的传输功率为

$$P = U_o I_o = \frac{n U_i U_o d(1-d)}{2fL} \quad (9)$$

式中,  $n$  为变压器变比;  $f$  为开关频率;  $L$  为变压器漏感。

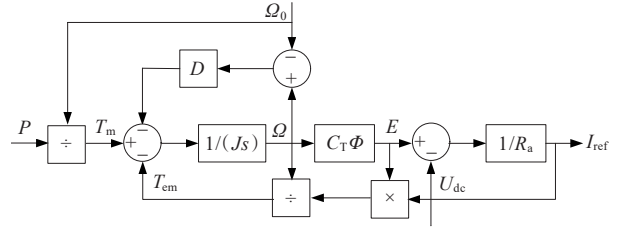
等式两边消去  $U_o$ , 得到输出电流  $I_o$  的表达式:

$$I_o = \frac{n U_i d(1-d)}{2fL} \quad (10)$$

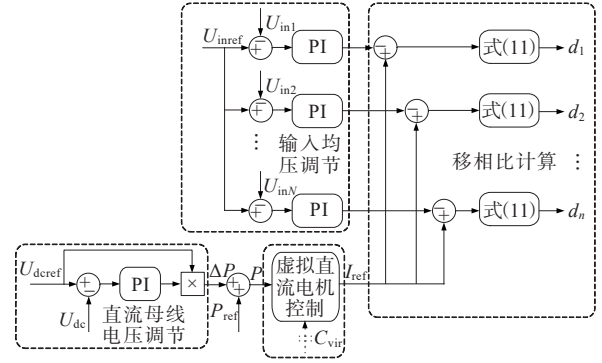
对式(10)求解得到移相比  $d$  的表达式:

$$d = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{8fLI_o}{nU_i}}}{2nU_i} \quad (11)$$

得到的IVS+VDCM控制策略框图如图7所示。



(a) 虚拟直流电机指令电流计算



(b) 控制算法

图7 IVS+VDCM控制框图

Figure 7 Control structure of IVS and VDCM

### 3 小信号建模与分析

为了分析虚拟直流电机参数对系统稳定性的影响, 对其进行小信号建模, 分析其工作稳定性。

对直流电机机械方程加入扰动项并结合直流电机电动势平衡方程后得:

$$J \frac{d(\Delta\Omega + \hat{\Delta}\Omega)}{dt} = (T_m + \hat{T}_m) - \frac{(C_T \Phi)^2 \Omega_0}{R_a} - \frac{(C_T \Phi)^2 (\Delta\Omega + \hat{\Delta}\Omega)}{R_a} - D(\Delta\Omega + \hat{\Delta}\Omega) \quad (12)$$

式中,  $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_0$ 。

将扰动项单独分离出来:

$$J \frac{d\hat{\Delta}\Omega}{dt} = \hat{T}_m - \frac{(C_T \Phi)^2 \Omega_0}{R_a} - \frac{(C_T \Phi)^2 \hat{\Delta}\Omega}{R_a} - D\hat{\Delta}\Omega \quad (13)$$

对式(13)进行拉氏变换并整理后得到虚拟直流电机传递函数:

$$G(s) = \frac{R_a}{JR_a s + (C_T \Phi)^2 + DR_a} \quad (14)$$

分析可知, 虚拟直流电机控制可以当作含有储能元件的一阶惯性环节, 惯性系数  $J$  为一阶惯性环节的惯性时间常数。在图7(b)中, 虚拟直流电机的作用效果相当于增加一个虚拟电容, 可通过改变虚

拟直流电机的参数来改变其容值,使直流母线具有一定的惯量,且虚拟电容值越大则直流母线惯性越大,能够有效地减小直流母线电压所受到的波动影响,使直流母线电压的稳定性进一步提高。其等效示意图如图8所示。

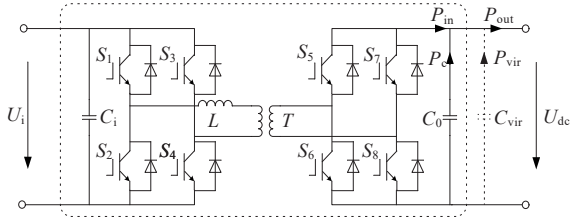


图8 虚拟直流电机等效示意图

Figure 8 Equivalent diagram of VDCM

虚拟电容加入前直流母线电容的功率方程为

$$P_{out} - P_{in} = P_c = C_o U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (15)$$

式中,  $P_{out}$  为注入直流母线的功率;  $P_{in}$  为变流器的输出功率;  $P_c$  为实际母线电容  $C_o$  的功率。当系统受到干扰时,直流母线电压发生变化,此时依靠直流母线电容吸收或释放功率来维持电压稳定。

虚拟电容加入后直流母线电容的功率方程为

$$P_{out} - P_{in} = P_c + P_{vir} = (C_o + C_{vir}) U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (16)$$

式中,  $P_{vir}$  为虚拟电容  $C_{vir}$  的功率,对比式(15)、(16)可得,当  $P_{out} - P_{in}$  的值不变时,由于虚拟电容的加入,实际母线电容吸收或释放的功率将减少,直流母线电压的变化量也将减少。因此,只需调节虚拟电容的大小即可平抑直流母线电压的波动并使其稳定。

为提高虚拟直流电机控制的效果,需对其参数进行分析与整定。由直流电机电动势平衡方程可得:

$$U = C_T \Phi \Omega - I_a R_a \quad (17)$$

两边对角速度  $\Omega$  求导:

$$\frac{\partial U}{\partial \Omega} = C_T \Phi \quad (18)$$

结合图7(a),得到的虚拟直流电机的小信号模型如图9所示。

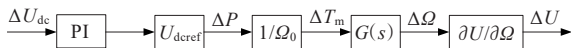


图9 虚拟直流电机小信号模型

Figure 9 Small signal model of VDCM

由此得到 DAB 输出电压偏差  $\Delta U$  与直流母线电压偏差  $\Delta U_{dc}$  之间的传递函数:

$$G'(s) = \frac{\Delta U}{\Delta U_{dc}} = G_{pi}(s) \frac{U_{dc}}{\Omega_0} G(s) \frac{\partial U}{\partial \Omega} = \frac{U_{dc}}{\Omega_0} \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{C_T \Phi R_a}{J R_a s + (C_T \Phi)^2 + D R_a} \quad (19)$$

对不同的惯性系数  $J$  和阻尼系数  $D$  下的系统稳定性进行分析,如图10、11所示。

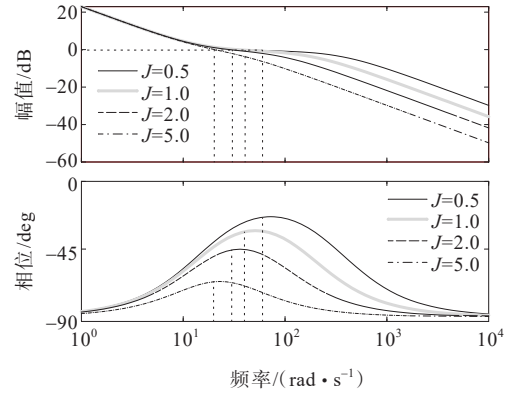


图10  $J$  变化时系统伯德图

Figure 10 Bode diagram of the system when  $J$  is changing

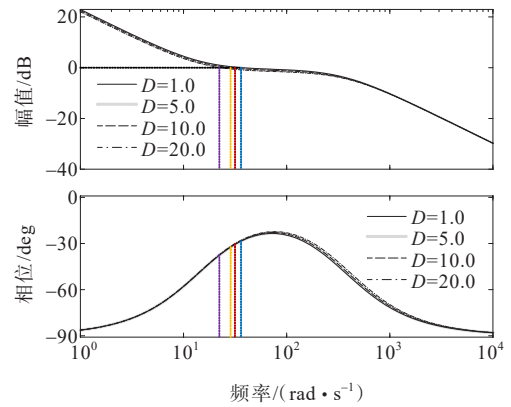


图11  $D$  变化时系统伯德图

Figure 11 Bode diagram of the system when  $D$  is changing

由图10、11可知,阻尼系数  $D$  不变时,随着惯量系数  $J$  的增加,系统截止频率减小,响应速度降低,趋于稳定的时间上升,即系统的惯量增加。惯量系数  $J$  不变时,随着阻尼系数  $D$  的增加,系统截止频率减小,相角裕度减小,系统的稳定性有所降低。

对于惯量系数  $J$  和阻尼系数  $D$  的选取,除了考虑系统自身的特性以外,还应考虑电源的响应时间等因素。例如,惯性系数  $J$  的选取范围应根据电源或负荷的动态响应速度进行选择,在文献[29]中,负荷侧与储能侧均采用虚拟直流电机控制,其中负荷侧的响应速度较快,惯性系数选取较小的值0.5;储能电池侧的响应速度较慢,惯性系数选取的值为2。通过上述分析,考虑系统响应速度及稳定性的

需求,仿真系统中惯性系数 $J$ 和阻尼系数 $D$ 分别取0.5和1。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真参数设置

为了验证所提控制策略的有效性,在上述分析的基础上,在MATLAB/Simulink搭建了图1所示的直流电路由器仿真模型,具体参数如表1所示,为了体现输入均压的效果,对变压器漏感设置2%的误差。

表1 参数取值表

Table 1 Parameter values

串并联 DAB个 数/个	并网侧 电压 $U_i/V$	直流母 线电压 $U_{dc}/V$	变压器 漏感 $L/\mu H$	惯性系 数 $J/$ ( $kg \cdot m^2$ )	阻尼 系数 $D$
3	3 000	500	100±2%	0.5	1

### 4.2 具体工况分析

为了分析各端口发生扰动的情况下,IVS+VDCM控制与共同移相比控制的效果,本文分别对光伏发电端口、交直流负载端口及储能电池端口设计了新能源电压波动、负载突变、储能投切以及各端口同时波动这4种情况下的仿真实验。

#### 1) 光伏发电端口功率波动。

为了模拟光伏发电端口出力的随机性与不稳定性,采用如图12所示的新能源功率随机波动波形,图13为各模块输入电压波形,图14为直流母线电压波形。当新能源功率随机波动时,共同移相比控制下各模块输入电压的差距随着时间的增加而越来越大,会使器件因过压而损毁,影响系统运行,在0.6 s时,直流母线电压最低达470 V左右;在1.2 s时,直流母线电压最高达517 V左右。若采用IVS+VDCM控制,无论新能源出力波动与否,各模块电压均稳定在1 000 V附近,0.6 s和1.2 s时直流母线电压分别为491、503 V,电压波动分别减少了70%和82%左右。也可看出IVS+VDCM控制下直流母线电压波动后恢复到500 V所需的时间更长,能够在一定程度上减慢电压变化的速度。

#### 2) 交直流负载端口功率突变。

为了体现在负载突变时IVS+VDCM控制的效果,设置0.2 s时,交流负载突增20 kW,0.4 s时,交流负载突减20 kW;0.6 s时,直流负载突减10 kW,

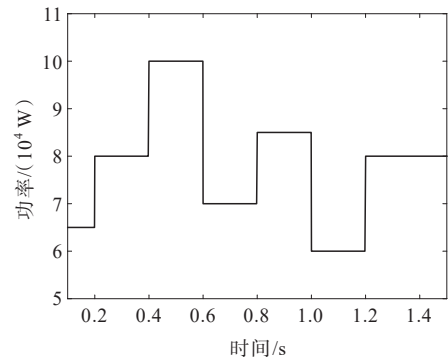
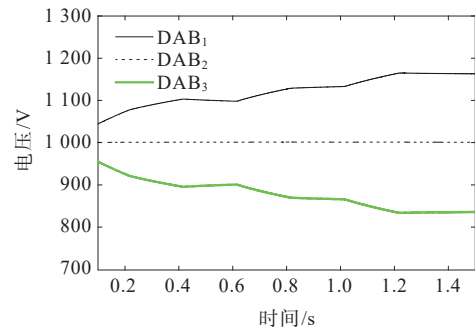
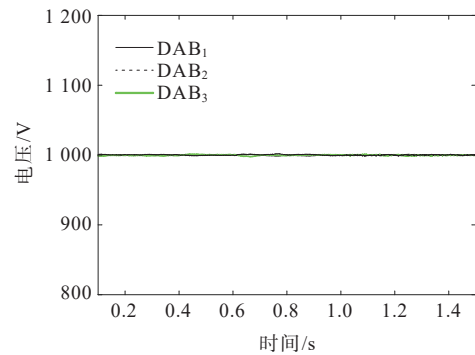


图12 新能源功率波形

Figure 12 Waveform of source power



(a) 共同移相比控制下输入电压波形



(b) IVS+VDCM控制下输入电压波形

图13 新能源功率波动时输入电压波形

Figure 13 Input voltage waveform when source power fluctuating

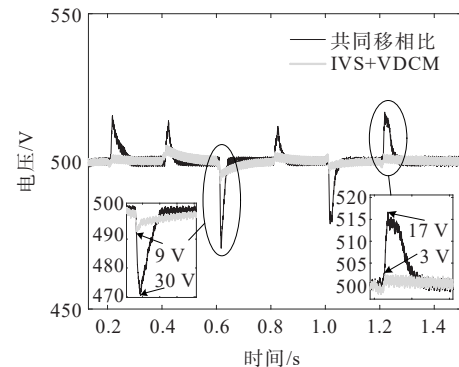
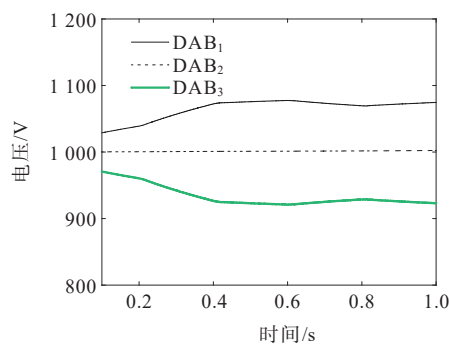


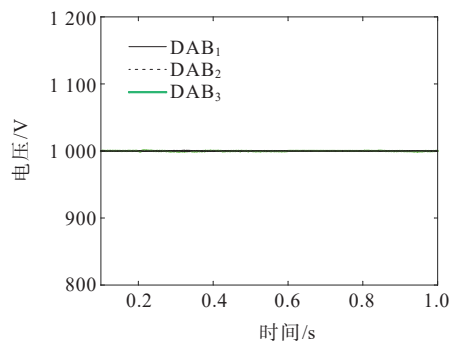
图14 新能源功率波动时直流母线电压波形

Figure 14 Waveform of DC bus when source power fluctuating

0.8 s时直流负载突增10 kW。图15、16分别为各模块输入电压和直流母线电压波形。若采用共同移相比控制,输入电压依然存在较大差别;在0.4 s时,直流母线电压提升至514 V左右,在0.8 s时,直流母线电压降低至488 V左右;若采用IVS+VDCM控制策略,无论负载是否发生突变,各模块电压均稳定在1 000 V附近,0.4 s和0.8 s时直流母线电压分别为505、497 V,电压波动分别减少了64%和75%左右。也可看出IVS+VDCM控制下直流母线电压波动后恢复到500 V所需的时间更长,能够减慢电压变化的速度。



(a) 共同移相比控制下输入电压波形



(b) IVS+VDCM控制下输入电压波形

图15 负载突变时输入电压波形

Figure 15 Input voltage waveform when load change

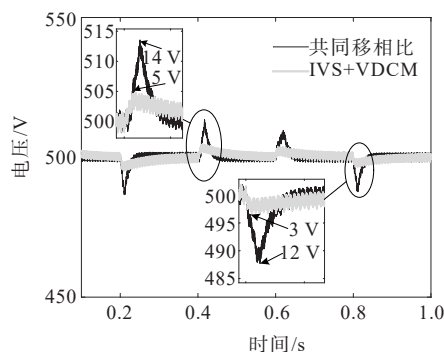
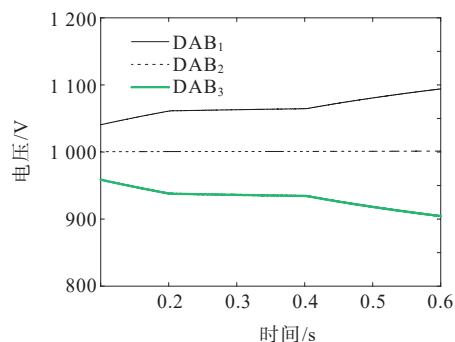


图16 负载突变时直流母线电压波形

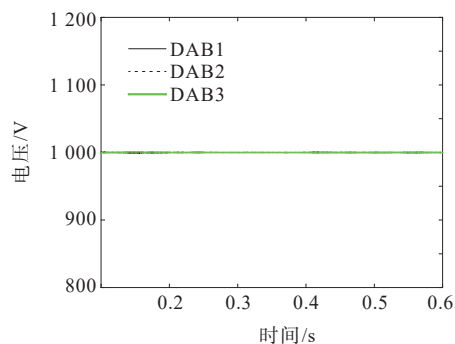
Figure 16 Waveform of DC bus when load change

### 3) 储能电池端口投入与切除。

为了体现储能设备投切时所提控制策略的效果,设置0.2 s时,储能设备从直流母线中切除,0.4 s时,重新投入。各模块输入电压波形及直流母线电压波形如图17、18所示。



(a) 共同移相比控制下输入电压波形



(b) IVS+VDCM控制下输入电压波形

图17 储能投切时输入电压波形

Figure 17 Input voltage waveform when energy storage switching

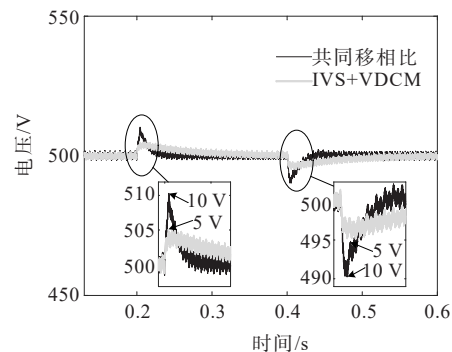


图18 储能投切时直流母线电压波形

Figure 18 Waveform of DC bus when energy storage switching

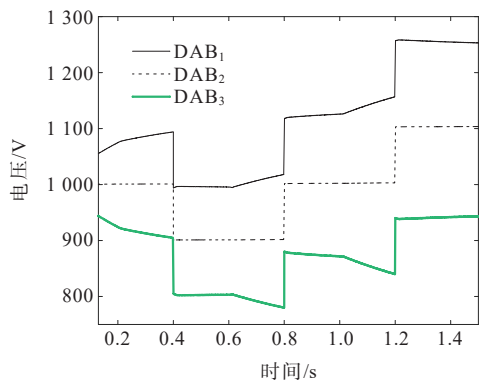
若采用共同移相比控制,在储能设备投入时,各模块输入电压差随时间的推移而增大,直流母线电压降低至490 V左右;储能切除时,输入电压差基本不变,直流母线电压上升至510 V左右;若采用



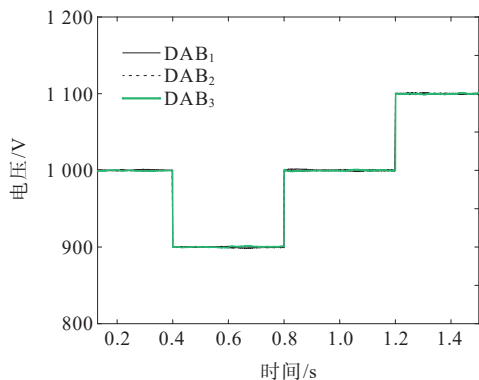
IVS+VDCM控制策略,无论储能投切与否,各模块电压均稳定在1 000 V左右,几乎不存在电压差,直流母线电压大小在储能投切时分别为495、505 V左右,电压波动均减小了50%。此外,同新能源功率波动和负载突变工况下一样,IVS+VDCM控制策略下直流母线波动后恢复时间更长,能够减慢电压变化的速度,与直流电机的惯性特性相符。

#### 4) 多端口综合工况。

为了进一步体现所提控制策略的有效性,在同时考虑上述端口作用的同时,对直流输入端口施加一定的扰动,0.4 s时输入电压降低10%,0.8 s恢复正常,1.2 s时上升10%,其他端口的波动与前文一致,结果如图19、20所示。若采用共同移相比控制,各模块间的输入电压差基本保持在100 V以上,若采用IVS+VDCM控制策略,在各端口波动的情况下,各模块输入电压之间仍然能够保持较小的差距。直流母线电压方面,从图20可以看出,无论在什么情况下,IVS+VDCM控制所产生的电压波动均小于共同移相比控制。



(a) 共同移相比控制下输入电压波形



(b) IVS+VDCM控制下输入电压波形

图19 综合模式下输入电压波形

Figure 19 Input voltage waveform in integrated mode

综上所述,对比研究共同移相比控制与IVS+VDCM控制,若直流电路由器各变换器参数存在

细微差别时,共同移相比控制无法实现各模块间的功率均衡,直流母线电压变化较大且较为突兀,容易损坏设备,影响系统运行的安全性与稳定性。而IVS+VDCM控制能够实现直流电路由器各模块间功率均衡的同时,还能向电网中注入一定的惯量,提高直流母线电压的稳定性,改善其电能质量;另外,在各端口出现扰动的情況下直流母线电压的波动是无法避免的,但IVS+VDCM控制能够在减小电压变化幅度的同时,减慢电压变化的速度,大大降低对系统的冲击。

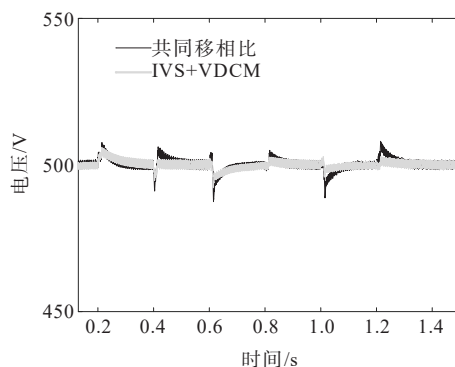


图20 综合模式下直流母线电压波形

Figure 20 Waveform of DC bus in integrated mode

## 5 结语

本文以直流电路由器为研究对象,提出了一种应用于直流输入端口中的输入均压与虚拟直流电机控制相结合的IVS+VDCM控制策略,通过小信号分析与仿真分析,所得结论如下。

1) 在直流电路由器中,与传统控制策略相比,虚拟直流电机控制策略能够有效地缓冲和抑制各端口发生扰动时造成的直流母线电压的波动,提高直流母线电压的质量。

2) 将输入均压与虚拟直流电机控制相结合得到的IVS+VDCM控制策略,解决了直流电路由器中的电力电子变压器无惯性与阻尼特性的缺陷,通过调节惯性系数与阻尼系数来提高直流母线电压稳定性的同时,解决了将多个变换器模块化组合后带来的功率均衡的问题,为直流电路由器控制策略提供参考与借鉴。

3) 所提的IVS+VDCM控制策略无须使用电流传感器,节省了系统硬件设计成本。

## 参考文献:

[1] 蔡福霖,胡泽春,曹敏健,等.提升新能源消纳能力的集

- 中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022,46(20):23-32.
- CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(20):23-32.
- [2] 李秀慧,崔炎. 考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置[J]. 储能科学与技术, 2022,11(11):3594-3602.
- LI Xiuhui, CUI Yan. Optimal allocation of energy storage in renewable energy grid considering the demand of peak and frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022,11(11):3594-3602.
- [3] 孙碣,康赫然,韩永强,等. 考虑新能源消纳的区域多能源系统网格化储能协调优化模型[J]. 可再生能源, 2020, 38(11):1551-1556.
- SUN Jie, KANG Heran, HAN Yongqiang, et al. Coordinated optimization model of grid-based energy storage in regional multi energy system considering renewable energy accommodation[J]. Renewable Energy Resources, 2020,38(11):1551-1556.
- [4] 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+20.
- 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+20.
- [5] 王秀茹,刘刚,黄华峰,等. 考虑分布式电源的配电网无功调度和储能优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4):134-142+208.
- WANG Xiuru, LIU Gang, HUANG Huafeng, et al. Reactive power dispatching and energy storage optimization for distribution network with distributed power resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(4):134-142+208.
- [6] 倪萌,王蓓蓓,朱红,等. 能源互联背景下面向高弹性的多元融合配电网双层分布式优化调度方法研究[J]. 电工技术学报, 2022,37(1):208-219.
- NI Meng, WANG Beibei, ZHU Hong, et al. Study of two-layer distributed optimal scheduling strategy for highly elastic multi-resource fusion distribution network in energy interconnection environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(1):208-219.
- [7] 郝文斌,孟志高,张勇,等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(14):23-33.
- HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(14):23-33.
- [8] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. 发电技术, 2022,43(3):476-484.
- LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022,43(3):476-484.
- [9] KESHAV S, ROSENBERG C. How Internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011,41(1):109-114.
- [10] 谭忠富,薛帆,樊伟,等. 基于合作博弈-云模型的农村能源互联网建设成熟度评价[J]. 智慧电力, 2022,50(10):9-14+22.
- TAN Zhongfu, XUE Fan, FAN Wei, et al. Maturity evaluation of rural energy Internet construction based on cooperative game-cloud model[J]. Smart Power, 2022, 50(10):9-14+22.
- [11] 席嫣娜,张宏宇,高鑫,等. 基于区块链的能源互联网大数据知识共享模型[J]. 电力建设, 2022,43(3):123-130.
- XI Yanna, ZHANG Hongyu, GAO Xin, et al. Knowledge sharing model based on blockchain for big data of energy Internet[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3):123-130.
- [12] 赵争鸣,冯高辉,袁立强,等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(13):3823-3834.
- ZHAO Zhengming, FENG Gaohui, YUAN Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(13):3823-3834.
- [13] 伍孟涛,王海生,闫小宇,等. 改进型预测函数在并联DC-DC中的应用[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023,40(1):78-84.
- WU Mengtao, WANG Haisheng, YAN Xiaoyu, et al. Application of improved predictive function in parallel DC-DC[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(1):78-84.
- [14] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012,36(8):98-104.
- JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8):98-104.
- [15] 姚宁,李德召,杜道忠,等. 适用于直流配电网的混合式断路器研究[J]. 高压电器, 2022,58(11):184-190.
- YAO Ning, LI Dezha, DU Daozhong, et al. Research on hybrid circuit breaker for DC distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(11):184-190.
- [16] 曾飞,苏伟,徐广开,等. 含快充负荷的低压直流互联配电网多时间尺度经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2022,38

- (1):14-23.  
ZENG Fei, SU Wei, XU Guangkai, et al. Multi-time scale economic dispatch of LVDC distribution network with fast charging load[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1):14-23.
- [17] 吴强, 段小峰, 罗刚, 等. 能量路由器集群接入辐射型配电网选址优化[J]. 中国电力, 2022, 55(11):103-108.  
WU Qiang, DUAN Xiaofeng, LUO Gang, et al. Research on location optimization of energy router cluster access to radial distribution network[J]. Electric Power, 2022, 55(11):103-108.
- [18] 高崇, 王天霖, 张俊潇, 等. 基于协同进化NSGA-II的多目标交直流配电网规划方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8):133-137.  
GAO Chong, WANG Tianlin, ZHANG Junxiao, et al. Multi-objective AC/DC distribution network planning method based on co-evolution NSGA-II [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8):133-137.
- [19] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25):9-19.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):9-19.
- [20] 王珍意, 黄文杰, 赵川, 等. 含分布式电源的中压柔性直流配电网研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1):102-108.  
WANG Zhenyi, HUANG Wenjie, ZHAO Chuan, et al. Research on flexible medium voltage DC distribution network with distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1):102-108.
- [21] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10):3039-3049.  
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10):3039-3049.
- [22] 陈少霞, 姚钢, 周荔丹, 等. 能源互联网中H桥直流能源路由器的研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7):41-46.  
CHEN Shaoxia, YAO Gang, ZHOU Lidian, et al. Research on H-bridge DC energy router in the energy Internet[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7):41-46.
- [23] 涂春鸣, 栾思平, 肖凡, 等. 基于下垂移相的三端口直流能量路由器功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11):4105-4114.  
TU Chunming, LUAN Siping, XIAO Fan, et al. A coordinated power control strategy of three-port DC energy router based on droop phase-shift[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):4105-4114.
- [24] 段青, 徐嘉超, 盛万兴, 等. 基于级联高频变压器的多端口直流电路由器[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2934-2941.  
DUAN Qing, XU Jiachao, SHENG Wanxing, et al. Multi-port DC electric energy router based on cascaded high frequency transformer[J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2934-2941.
- [25] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25):4295-4303.  
ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. High-frequency-link DC solid state transformers for flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25):4295-4303.
- [26] 葛健, 杨晨, 杨景刚, 等. 基于通用电能路由器的微电网架构及其控制方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1):123-130.  
GE Jian, YANG Chen, YANG Jinggang, et al. A micro-grid architecture based on universal energy router unit and its control method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1):123-130.
- [27] 艾欣, 荣经国, 吕正, 等. 一种新型的能量路由器结构及其控制策略的研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4):1202-1210.  
AI Xin, RONG Jingguo, LÜ Zheng, et al. Research on structure and control strategy of a novel energy router[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1202-1210.
- [28] 冯高辉, 赵争鸣, 袁立强. 基于能量平衡的电能路由器综合控制技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14):34-44.  
FENG Gaohui, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang. Synthetical control technology of electric energy router based on energy balance relationship[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14):34-44.
- [29] 盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3541-3550.  
SHENG Wanxing, LIU Haitao, ZENG Zheng, et al. An energy hub based on virtual-machine control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3541-3550.
- [30] 贾俊国, 庞松楠, 董瑞彪, 等. 基于虚拟同步发电机控制技术的能量路由器交直流协调控制[J]. 现代电力, 2019, 36(2):33-39.  
JIA Junguo, PANG Songnan, DONG Ruibiao, et al. AC/DC coordinated control of power router based on virtual synchronous generator control technology[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2):33-39.
- [31] 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+26.  
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+26.
- [32] ENGEL S P, SOLTAU N, STAGGE H, et al. Dynamic and balanced control of three-phase high-power dual-active bridge DC-DC converters in DC-grid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4):1880-1889.
- [33] ZHANG R, WANG D, MAO C X, et al. Dual active bridge synchronous chopper control strategy in electronic power transformer[J]. IET Electric Power Applications, 2014, 8(3):89-97.