

基于模糊逻辑控制的光储直柔双极系统不平衡电压抑制策略

谭昊¹, 周平¹, 管真琪¹, 李音洁¹, 刘华勇¹, 周念成², 王强钢², 杨美辉²

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 401120; 2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院), 重庆 400044)

摘要: 光储直柔双极系统参数变化会导致正、负极母线电压不平衡, 在增加网络损耗的同时还会威胁系统正常运行。对此提出了基于模糊逻辑控制的光储直柔双极系统不平衡电压抑制策略。首先, 根据光储直柔双极系统结构和电流平衡方程, 分析了系统参数对极间电压不平衡度的影响作用。然后, 利用模糊逻辑控制器, 根据正负极电压和系统电压不平衡采集数据修正各电源换流器下垂控制参数, 调整各电源换流器输出电压和功率, 最终将光储直柔双极系统的极间电压不平衡度抑制在可接受范围。在光储直柔双极系统仿真模型上进行的不平衡电压抑制试验验证了所提方法的有效性。

关键词: 光储直柔双极系统; 不平衡电压; 模糊控制; 下垂控制

Unbalanced Voltage Suppression Strategy of PEDF Bipolar System Based on Fuzzy Logic Control Method

TAN Hao¹, ZHOU Ping¹, GUAN Zhenqi¹, LI Yinjie¹, LIU Huayong¹, ZHOU Niancheng²,
WANG Qianggang², YANG Meihui²

(1. State Grid Chongqing Economic Research Institute, Chongqing 401120, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Parameter variations in the photovoltaic, energy storage, direct current, and flexibility (PEPF) bipolar system will lead to unbalanced voltages between the positive and negative busbars, increasing network losses while threatening system stability. To address this, an imbalance voltage suppression strategy based on fuzzy logic control is proposed. Firstly, the impact of system parameters on inter-pole voltage imbalance is analyzed based on the structure of the photovoltaic storage direct-flexible bipolar system and current balance equations. Then, a fuzzy logic controller is employed to adjust the droop control parameters of each power source converter by collecting data on positive/negative busbar voltages and system voltage imbalance. This process modifies the output voltage and power of each power source converter, ultimately suppressing the inter-pole voltage imbalance of the photovoltaic storage direct-flexible bipolar system within an acceptable range. Simulation tests on the photovoltaic storage direct-flexible bipolar system model validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: photovoltaic, energy storage, direct current, and flexibility bipolar system; unbalanced voltage; fuzzy control; droop control

0 引言

随着光伏、储能等分布式电源的大量接入, 直

流微电网因其供电效率高、输送损耗小、控制成本低等优势, 得到快速发展^[1-3]。双极直流系统因其灵活的电压等级和较高的供电可靠性^[4-5], 吸引了

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52077017); 国网重庆市电力公司经济技术研究院科学技术项目(SGCQJY00JHJS2310073)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52077017); the Scientific and Technological Project of State Grid Chongqing Economic Research Institute (SGCQJY00JHJS2310073) .

众多学者的关注,具有极大的发展潜力。然而双极电源电压、分布式电源出力、系统拓扑结构等参数不平衡,会使双极直流系统中线出现电流,导致正、负极母线电压不平衡,造成系统损耗增加,甚至系统电压崩溃^[6]。因此,实现双极直流系统动态不平衡电压抑制对光储直柔(photovoltaic,energy storage,direct current, and flexibility, PEDF)双极系统安全、稳定运行尤为重要。

目前, PEDF 双极系统不平衡电压抑制策略主要分为电压平衡器、电压变换器、其他方法 3 类。在电压平衡器方面,文献[7]提出一种简单的 Buck/Boost 型电压平衡器,并将其应用于双极直流配电网;针对 Buck/Boost 型电压平衡器开关管击穿问题。文献[8]进行了改进,并提出了双 Buck/Boost 型电压平衡器;文献[9]中有学者提出了一种通过控制电源换流器出口处电压平衡器的输出进而调节多端供电的双极直流微电网母线电压的策略。在文献[9]提出的控制策略的基础上,文献[10]进一步着眼于电压平衡器的拓扑结构研究,提出了 Cuk 型、Super-Sepic/Zeta 型和交错并联 Buck/Boost 型的电压平衡器。文献[11]提出了一种基于三电平双有源桥(dual active bridge, DAB)变换器的单级电压平衡器,该方法利用增强型开关调制控制,以实现适当的电压平衡。然而,该方案依赖于大量有源开关,增加了系统复杂性。文献[12]提出了一种三电平双向降压-升压电压平衡(voltage balancing, VB)拓扑,用于连接储能系统,其电压平衡能力依赖于储能单元的支持。

在电压变换器方面,文献[13-14]提出三电平 AC/DC 电压变换器,实现双极直流微电网不同工作条件下的不平衡电压抑制;文献[15]提出双极直流微电网分层控制策略,通过本地控制和二次控制,实现中点不平衡电位抑制;文献[16]提出了一种三电平中性点钳位变换器(3L-NPC)用于抑制电压不平衡,从而提升电能质量。英国的 ± 27 kV 双极中压直流(medium voltage DC, MVDC)示范项目 ANGLE-DC 即采用了基于 3L-NPC 的双极直流配电方案^[17]。然而,由于 3L-NPC 在电压平衡方面具有固有但有限的工作区域,其应用场景受到了限制^[12]。文献[18]在 3L-NPC 结构的基础上增加了专用的电压平衡器,以确保在各种负载条件下的直流电压平衡。然而,这不可避免地增加了系统的整体

成本、损耗和复杂性。

此外,还有学者提出通过在双极直流微网中配置直流电力弹簧,结合前馈解耦控制,能够有效抑制极间不平衡电压和减少因极间不平衡电压导致的功率损耗^[19]。文献[20]通过分析对比不同极间负荷分布情况下中线电流的大小,提出了一种基于电力电子开关的负荷切换策略,通过开关改变负荷的连接极性从而均衡极间负载功率以抑制极间不平衡电压,且该策略能够有效抑制开关动作导致的冲击电流。上述研究通过加装开关电器、负荷开关在线切换等方式实现 PEDF 双极系统中不平衡电压控制,大幅增加了系统复杂性和投资成本,并且未采用逻辑算法控制策略,实现更高效的不平衡电压抑制。

针对 PEDF 双极系统不平衡电压抑制,本文根据双极直流微电网的结构特性,分析并推导了 PEDF 双极系统中,连接在正极与中线,中线与负极之间的分布式电源换流器输出电压和负载功率,以及中线电阻对极间电压不平衡度的影响。进而提出基于模糊逻辑控制的 PEDF 双极系统不平衡电压抑制策略。最后搭建双极直流系统仿真模型验证了本文方法的有效性。

1 双极直流系统结构及不平衡电压分析

1.1 双极直流系统结构

根据拓扑结构, PEDF 双极系统主要分为两类:真双极结构和伪双极结构。伪双极结构中正负极电源由一个换流器和电压平衡器构成,而真双极结构中的正负极电源由两个独立的换流器构成^[21]。相比于伪双极结构,真双极结构拥有更高的可靠性。本文以真双极结构的 PEDF 双极系统结构为对象开展不平衡电压研究,其拓扑如图 1 所示。该系统的母线由正极、中线和负极构成,正负极分布式电源分别连接在正极和中线、中线和负极之间。相同地,正极负载和负极负载分别接在正极和中线,以及中线和负极之间。通过调整分布式电源中 DC/DC 换流器的控制参数可以调整分布式电源注入到双极直流系统的功率。

1.2 系统不平衡电压分析

在电源输出功率相同的条件下不平衡的正负极间负载会导致正负极间电压不平衡。极间不平衡电压会导致中线上出现电压降落,以及额外的损耗,当电压不平衡程度较大时,甚至会影响到负载的正

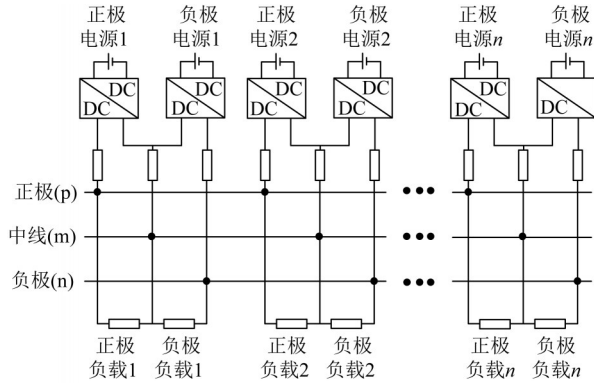


图1 PEDF双极系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of PEDF bipolar system

常运行。电压不平衡度是用于评估正负极间电压不平衡程度的常用指标。为保证PEDF双极系统的稳定运行以及减少功率损耗, ANSI C84建议将电压不平衡度限制在3%以内^[22]。电压不平衡度指标的定义如式(1)所示。

$$v_{hbi} \% = \frac{2|v_{pi} - v_{ni}|}{(v_{pi} + v_{ni})} \times 100 \% \quad (1)$$

式中: v_{hbi} 为节点 i 的电压不平衡度指标值; v_{pi} 和 v_{ni} 分别为正、负极母线相对于中线的电压, 下标 p、n 分别表示正极和中线、中线和负极之间。

为了更进一步研究 PEDF 双极系统中连接在正极与中线、中线和负极的分布式电源换流器输出电压, 负载功率, 和线路参数对极间电压不平衡度影响特性, 本文以图2所示的等效 PEDF 双极系统为研究对象展开研究, 图中的负载为恒阻抗负载^[23-24]。

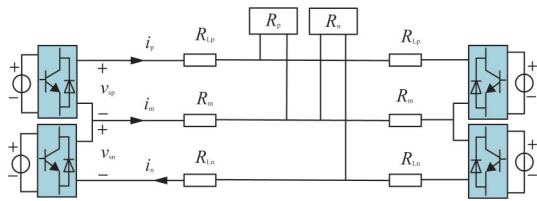


图2 PEDF双极系统等效模型

Fig. 2 Equivalent model of PEDF bipolar system

根据基尔霍夫电流定律可以得到该简化模型的电流平衡方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_p(R_{Lp} + R_p) - i_m R_m - v_{sp} = 0 \\ i_n(R_{Ln} + R_n) + i_m R_m - v_{sn} = 0 \\ i_m = i_n - i_p \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_p 和 R_n 分别为正极和负极负载的电阻值;

R_{Lp} 、 R_{Ln} 和 R_m 分别为正极、负极和中线的线路电阻; i_p 、 i_n 和 i_m 分别为正极、负极和中线上的电流; v_{sp} 和 v_{sn} 分别为正极和负极分布式电源换流器的出口电压。在实际工程中, 正负极和中线电阻一般相等, 设 $R_{Lp} = R_{Ln} = R_L$ 。

通过求解式(2)得到正极与中线、中线与负极之间的电压。极间电压不平衡度与系统参数、正负极负载和分布式电源输出之间的关系分别如式(3)和(4)所示。

$$\begin{cases} v_p = \frac{[(R_L + R_n + R_m)v_{sp} + R_m v_{sn}]R_p}{[(R_L + R_p + R_m)(R_L + R_n + R_m) - R_m^2]} \\ v_n = \frac{[(R_L + R_p + R_m)v_{sn} + R_m v_{sp}]R_n}{[(R_L + R_p + R_m)(R_L + R_n + R_m) - R_m^2]} \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{hbi} \% = \frac{2 \left| \frac{[R_p R_m - R_n(R_L + R_p + R_m)]v_{sn} + [R_p(R_L + R_n + R_m) - R_n R_m]v_{sp}}{[R_p R_m + R_n(R_L + R_p + R_m)]v_{sn} + [R_p(R_L + R_n + R_m) + R_n R_m]v_{sp}} \right|}{1} \times 100 \% \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)所示的关系, 令式中的 R_m 、 R_L 、 R_p 和 R_n 分别为 0.01Ω 、 0.03Ω 、 10Ω 和 10Ω 。结合实际, 设该系统极间额定电压为 400 V , 且正负极分布式电源的换流器输出电压在 $380 \sim 420 \text{ V}$ 之间波动。根据式(4)可以得到该 PEDF 双极系统中分布式电源换流器输出电压对极间电压不平衡度的影响特性如图3所示。根据图3中曲线可知, PEDF 双极系统的电压不平衡度与极间分布式电源换流器的输出电压之间呈正相关关系, 当极间分布式电压换流器的输出电压相等时, PEDF 双极系统的电压不平衡度为 0 , 随着极间分布式电源换流器输出电压的差值不断增大, PEDF 的极间电压不平衡度也随之不断增大, 直至超过 3% 。此时, 严重的极间电压不平衡现象会影响到负载的正常运行, 同时造成较大的功率损耗。为避免以上现象, 保证 PEDF 双极系统的极间电压不平衡度在 3% 范围以内, 此时应该对极间分布式电源换流器的输出电压进行调整。图3中 x - y 平面阴影部分为电压不平衡度小于 3% 部分的投影。可以根据阴影部分的边界, 设计相应的极间分布式电源换流器的控制策略, 以调节极间分布式电源换流器的输出电压, 从而将 PEDF 双极系统的电压不平衡度控制在 3% 以内。

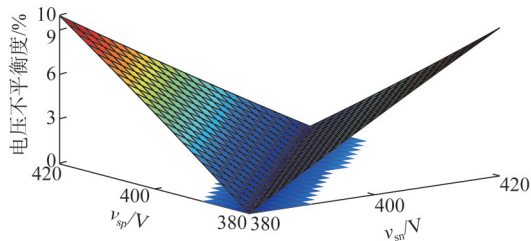


图3 分布式电源输出电压对极间电压不平衡度的影响特性
Fig. 3 Influence of distributed power converter output voltage on voltage unbalance degree between conductors

为了进一步研究 PEDF 双极系统中负载功率对极间电压不平衡度的影响规律, 设极间分布式电源换流器的输出电压相等, 当 PEDF 双极系统平衡时, 负载电阻为 $10\ \Omega$, 消耗功率为 $16\ \text{kW}$ 。且通过改变负载电阻使其功率在 $0\sim 20\ \text{kW}$ 范围内波动。此外, 为进一步研究 PEDF 双极系统的中线电阻与极间电压不平衡度的定量关系, 分别在考虑和不考虑中线电阻的条件下, 计算负载功率 PEDF 双极系统的极间电压不平衡度, 其关系如图 4 所示。根据图 4 的三维图可知, 在 PEDF 双极系统中, 负载功率的不平衡程度越大, 极间电压不平衡度就越大。且在此过程中, 中线电阻会加重不平衡的负载功率对 PEDF 双极系统极间电压不平衡度的影响。因此, 对于有较高精度要求的场景, 在评价 PEDF 双极系统的极间电压不平衡度的过程中必须考虑中线电阻的影响。为了有效地抑制 PEDF 双极系统的极间不平衡电压, 选择合适的中性线电阻值是非常重要的。

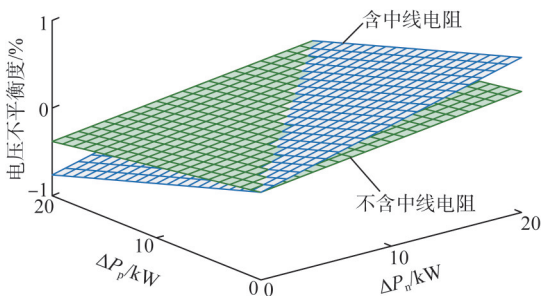


图4 中线电阻对极间电压不平衡度的影响特性
Fig. 4 Influence of neutral line resistance on voltage unbalance degree

2 基于模糊算法的不平衡电压抑制策略

2.1 模糊算法基本原理

模糊控制可以在缺乏精确描述系统的数学模型

的条件下, 仅仅依靠于人们在实际操作中总结出来的模糊控制规则实现对系统的较好控制^[23]。在控制过程中, 人们只需依据自身经验设定一些大致的控制准则, 同时观察当前系统的具体运行状况。通过模糊的评估和逻辑推导, 能够计算出需要的控制动作, 从而有效地对目标系统进行控制。

模糊控制的基本原理框图如图 5 所示。其中模糊控制器是模糊控制系统最重要的组成部分, 模糊控制器的结构如图 6 所示, 主要有知识库、模糊化接口、模糊推理机、反模糊化接口。

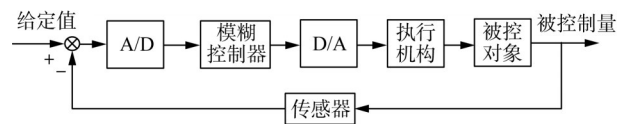


图5 模糊算法控制逻辑框图

Fig. 5 Fuzzy algorithm control logic block diagram

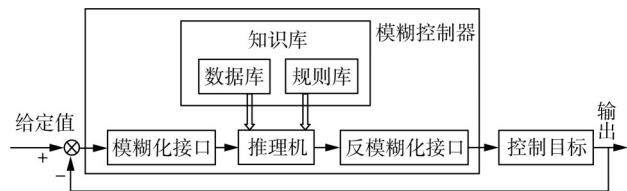


图6 模糊逻辑控制器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of fuzzy logic controller

模糊控制器的输入环节即模糊化接口, 负责把输入的确切值转换成模糊值向量, 这一过程称为模糊化。模糊集合的所有特性都能通过隶属度函数来表示, 这是模糊逻辑理论的关键所在, 而本文主要使用的是三角形隶属度函数。在一个模糊控制系统里, 其知识结构是由一个数据库和一个规则库组合而成的。数据库的职责是记录控制活动中所有的输入和输出变量以及它们的相关数据, 规则库通过模糊逻辑为控制器提出决策规则。通过利用这些已经设定好的知识, 推理机能够执行模糊关系之间的映射。然后, 反模糊处理接口将这些模糊值转化, 最终生成实际的控制信号。

2.2 不平衡电压模糊-下垂控制

首先采集 PEDF 双极系统中的极间电压不平衡度, 以及节点的电压幅值, 然后利用模糊控制器对电源换流器的下垂系数进行修正, 可以有效地抑制系统中的电压不平衡现象。

光储直柔双极系统分布式电源的模糊-下垂控制系统如图 7 所示。

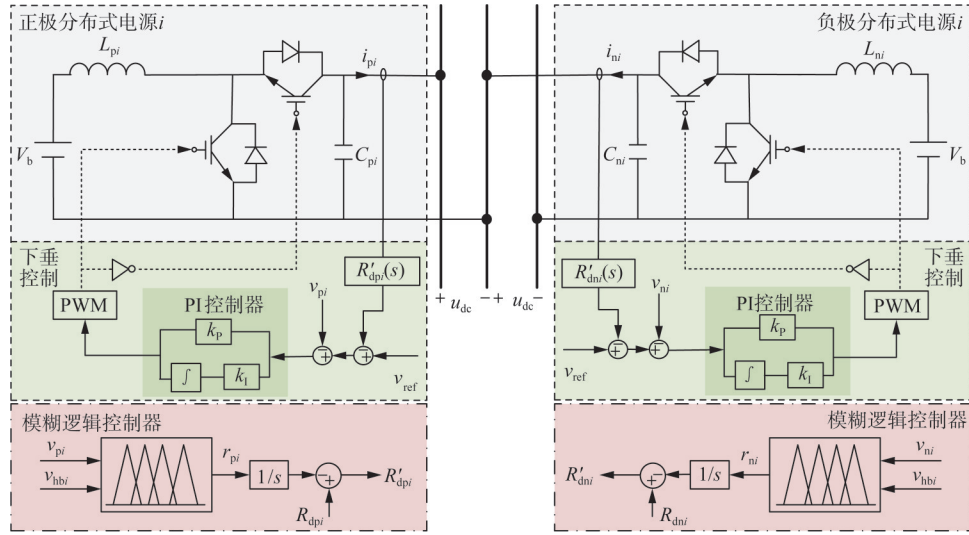


图7 不平衡电压模糊-下垂控制框图

Fig. 7 Block diagram unbalanced voltage fuzzy-droop control

通过控制下垂控制的下垂系数可以控制分布式电源换流器向 PEDF 双极系统的注入功率。图 7 中的控制可以分为一次控制和二次控制, 在一次控制中, 首先采集分布式电源换流器输出电流 i_{pi} 和 i_{ni} , 然后用母线电压参考值 v_{ref} 减去采集电流与下垂系数的积, 得到的差值作为二次控制输出的一部分^[25]。将二次控制输出与母线正极和中线间电压 v_{pi} (中线和负极间电压 v_{ni}) 相减, 其差值作为 PI 控制器的输入, PI 控制器的输出为分布式电源换流器中开关器件的占空比 d 。 k_p 和 k_i 分别为 PI 控制器比例环节的增益系数和积分环节的增益系数。模糊逻辑控制器的作用在于根据母线电压信息生成下垂系数的修正量。首先, 采集母线正极和中线间电压 v_{pi} 、中线和负极间电压 v_{ni} 以及极间电压不平衡度 v_{hbi} 作为隶属度函数的输入, 隶属度函数的输出经过积分后得到当前下垂系数的修正量, 并对当前下垂系数进行修正。在模糊逻辑控制中下垂系数按照式(5)进行修正更新^[26]。

$$\begin{cases} R'_{dpi} = R_{dpi} - \int r_{pi} \\ R'_{dni} = R_{dni} - \int r_{ni} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_{dpi} 和 R_{dni} 分别为待修正更新的正负极电源换流器的下垂系数; R'_{dpi} 和 R'_{dni} 分别为修正更新后的正负极电源换流器的下垂系数; r_{pi} 和 r_{ni} 分别为正负极电源换流器的模糊逻辑控制器中隶属度函数的输出量。

在模糊逻辑控制器的参与下电压下垂系数能够得到及时的修正, 从而实现将 PEDF 双极系统中各节点的极间电压不平衡度抑制在可接受的范围内。此外, 也有利于抑制母线电压波动, 方便系统内节点间的功率分配。

如图 8 所示, 正极与中线间电压 v_{pi} 、中线和负极间电压 v_{ni} 及极间电压不平衡度 v_{hbi} 的模糊控制器隶属度函数划分为 A 至 G 7 个由小到大的模糊区间。而输出 $r_{ni}(r_{pi})$ 的模糊子集则由 NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB 这 7 种级别组成。

通过对模糊控制器输出量 $r_{ni}(r_{pi})$ 进行积分, 将积分结构用于修正下垂系数, 可以有效地增强阻性下垂特性。这种调整有利于保证分布式电源所在支路的电流均衡性, 从而优化各分布式电源之间的功率分配。然而, 这种方法可能会导致母线电压的偏差加大。PEDF 双极系统的极间电压不平衡度 v_{hbi} 越大, 模糊控制器输出的补偿量 $r_{ni}(r_{pi})$ 越大, 反之亦然。此外, 当母线电压大于母线额定电压时应该正向增大电源换流器的下垂系数, 而当母线电压小于额定电压时, 则应该减小换流器下垂系数。直到母线电压在额定电压附近允许的范围之内时停止调整换流器下垂系数。

为了实现上述功能, 需要事先根据被控系统为模糊控制器生成一套模糊规则, 该规则被用于映射控制器的输入输出。这套规则和模糊控制的理论基础相结合, 可以推导出适用于 PEDF 双极系统的控

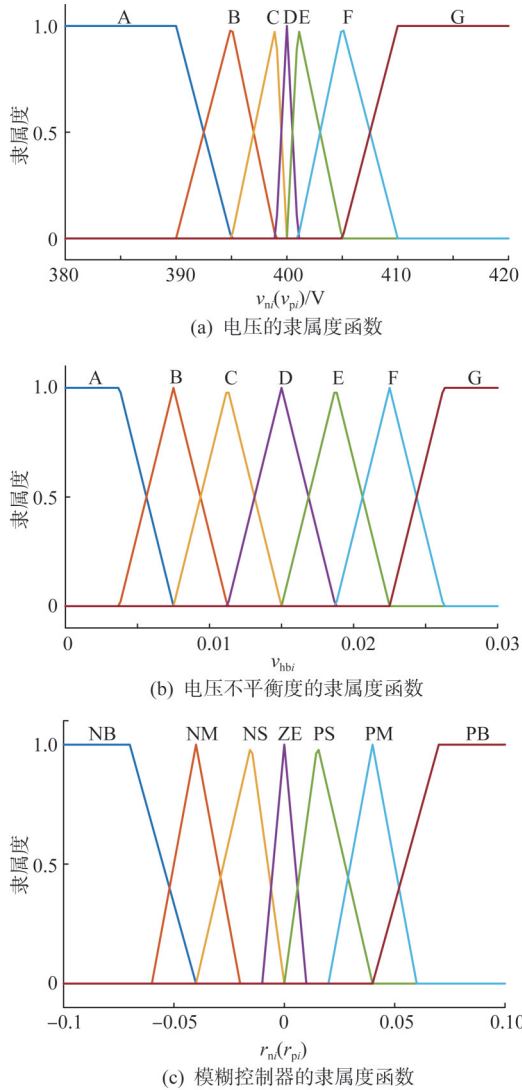


图 8 模糊控制系统的隶属度函数

Fig. 8 Membership function of fuzzy control system

制策略，并通过模拟得到具体的推理结果，如图 9 所示。

2.3 稳定性分析

修正更新后的下垂系数 R'_{di} ($i=1, 2, 3, 4$) 的取

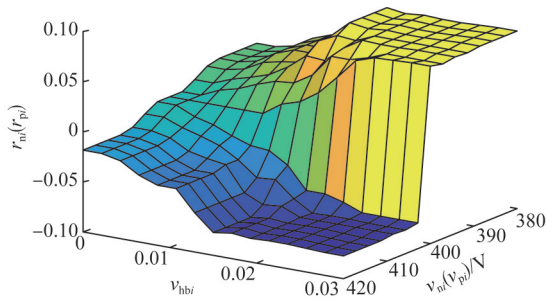


图 9 模糊控制器的逻辑推理结果

Fig. 9 Logical inference result of fuzzy controller

值与直流微电网的电压偏差要求相关， R'_{di} 需满足：

$$R'_{di} \leq \left| \frac{\Delta V_{\max}}{I_{i\max}} \right| \quad (6)$$

式中： $\Delta V_{\max}$ 为允许的直流母线电压的最大变化量，一般为直流母线额定电压的 3%； $I_{i\max}$ 为节点 i 电源换流器的最大输出电流，由式(6)可得修正更新后的下垂系数 $R'_{di} \in [0, 0.4]$ 。

由文献[27]可知，以 Boost 为例的分布式电源换流器的小信号模型为：

$$\begin{cases} G_{vd}(s) = \frac{V_{in}}{D'} \cdot \frac{1 + s \frac{L}{RD'^2}}{1 + s \frac{L}{RD'^2} + s^2 \frac{LC}{D'^2}} \\ G_{id}(s) = \frac{V_{in}}{RD'^2} \cdot \frac{2 + sRC}{1 + s \cdot \frac{L}{RD'^2} + s^2 \cdot \frac{LC}{D'^2}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： V_{in} 为输入电压； D 为稳态占空比， $D'=1-D$ 。 L 为电感值； C 为电容值； R 为负载电阻； s 为拉普拉斯算子。图 10 为变流器的控制框图，根据图 10，由梅逊公式可推导得到该支路的输出阻抗为：

$$Z_{out} = - \frac{R'_{di} G_v G_{vd}}{1 + G_v \cdot G_{vd} - sCR'_{di} G_v G_{vd} + R'_{di} G_v G_{id} D'} \quad (8)$$

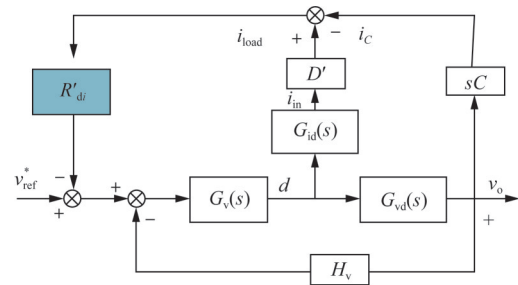


图 10 电流源变换器的控制框图

Fig. 10 Control block diagram of the current source converter

根据式(8)可绘制电流源变换器的输出阻抗奈奎斯特曲线如图 11 所示，由图 11 可看出，所有奈奎斯特曲线均不包围点 $(-1, 0)$ ，且随着模糊控制输出的下垂系数的减小，奈奎斯特曲线所包含的范围逐渐缩小，即稳定裕度逐渐增大。模糊控制输出的下垂系数最大值为 0.4，此时的奈奎斯特曲线也不包围点 $(-1, 0)$ ，因此基于所提的控制策略系统可以稳定运行。

3 算例仿真

在 MATLAB/Simulink 中搭建图 12 所示的光储

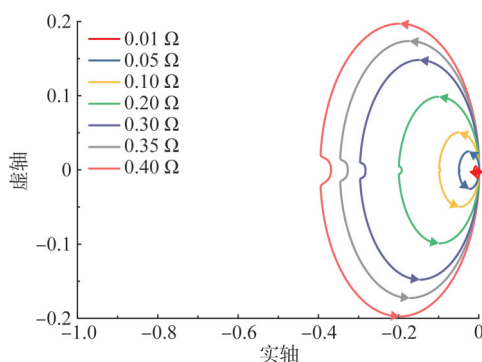


图 11 下垂系数变化时电流源变换器的奈奎斯特曲线

Fig. 11 Nyquist curves of the current source converter with varying droop coefficients

直柔双极系统仿真模型。开始仿真之前, 设置各节点处, 接在正极与中线, 中线与负极之间的负载如表 1 所示, 系统线路参数和控制器参数如表 2 所示。

3.1 模糊-下垂控制仿真结果

为了验证本文方法在光储直柔双极系统不平衡

表 1 负载参数

Tab. 1 Parameters of loads

参数	数值	参数	数值
R_{p1}/Ω	5	R_{n1}/Ω	20
R_{p2}/Ω	20	R_{n2}/Ω	40
R_{p3}/Ω	20	R_{n3}/Ω	20
R_{p4}/Ω	20	R_{n4}/Ω	5

表 2 控制系统参数	
Tab. 2 Parameters of control system	
参数	数值
v_{ref}/V	400
$R_{Lpf}/R_{Lni}/\Omega$	0.03
R_{mi}/Ω	0.01
$R_{dpr}/R_{dni}/\Omega$	0.02
k_p/k_i	0.03/3

电压控制方面的优势, 对同一系统设置了两个场景, 即 1) 仅采用下垂控制; 2) 采用模糊下垂控制。在 0—2 s 之内, 仅有下垂控制被投入, 第 2 s 时刻, 切换控制策略为模糊-下垂控制, 得到的结果如图 13 所示。

根据图 13 所示波形, 在 0—2 s 之内, 由于 PEDF 双极系统中线路电阻的存在, 正极与中线、中线与负极之间的电压均小于 400 V。因为负载功率, 以及与电源之间的线路电阻不同的原因, 每个节点的极间电压也不尽相同。由图 13(a)—(b) 中电压曲线可知, 2 s 之后, 切换到模糊-下垂控制之后, 各节点的极间电压都有明显提升。虽然由于线路电阻和负载功率不同, 导致每个节点的极间电压提升程度不同, 但各节点的极间电压都向额定电压靠近。

根据图 13(c) 中的曲线可知, 0—2 s 时间段内, 各个节点的极间电压均低于额定电压, 且每个节点

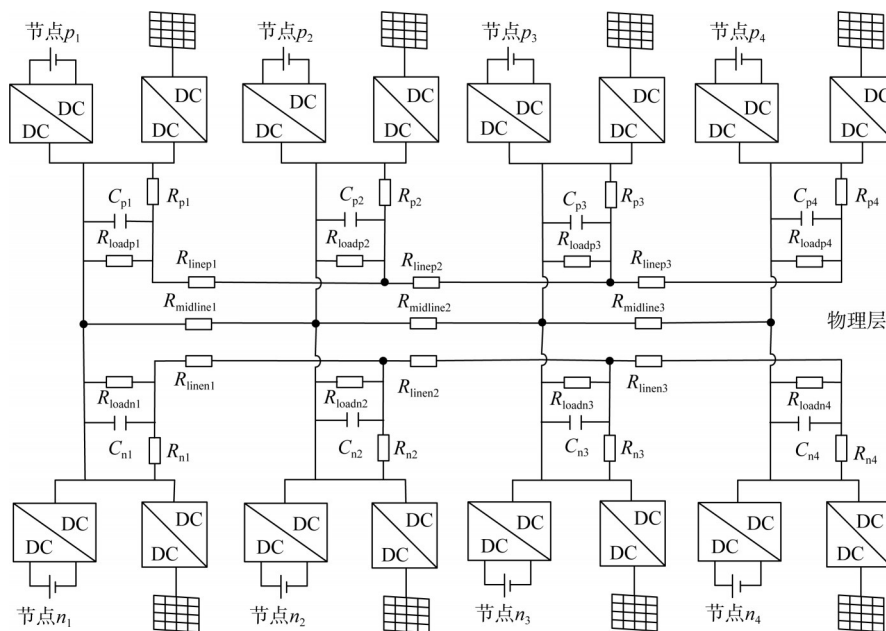


图 12 光储直柔双极系统仿真模型

Fig. 12 Simulation model of photovoltaic storage straight flexible bipolar system

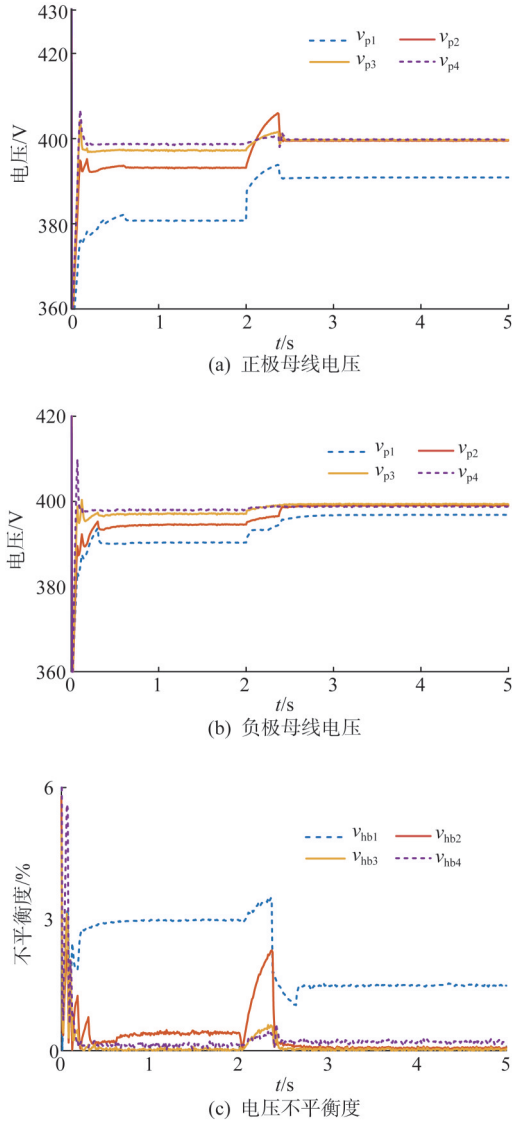


图 13 不平衡电压控制仿真结果

Fig. 13 Simulation results of unbalanced voltage control

的极间电压不平衡度有所差异。在所有节点中节点 1 的极间电压不平衡度最大, 达到了 3%。在 2 s 之后模糊-下垂控制投入, 可以发现, 在分布式电源换流器的控制下, 各节点的极间电压不平衡度都有明显下降, 且节点 1 的极间电压不平衡度下降最多, 其次则是节点 2。最终所有节点的极间电压不平衡度均被抑制在 3% 以内。

3.2 负荷变动对控制效果影响

为了研究负荷功率变化对模糊-下垂控制策略的影响, 采用如下场景设置, 即在 0—5 s 时间段内, 所有分布式电源换流器均采用模糊-下垂控制, 5 s 时在节点 4 正极与中线之间投入一个功率为 40

kW 的负载, 得到的仿真波形如图 14 所示。根据图 14(a)—(b) 中波形可知, 当负载被投入时, 虽然节点极间电压会出现波动, 但是波动幅值较小, 节点极间电压仍然保持着在 400 V 左右。从图 14(c) 中可以看出, 模糊-下垂控制可以在负荷功率变化时快速响应, 将 PEDF 双极系统的极间电压不平衡度抑制在 3% 以内。

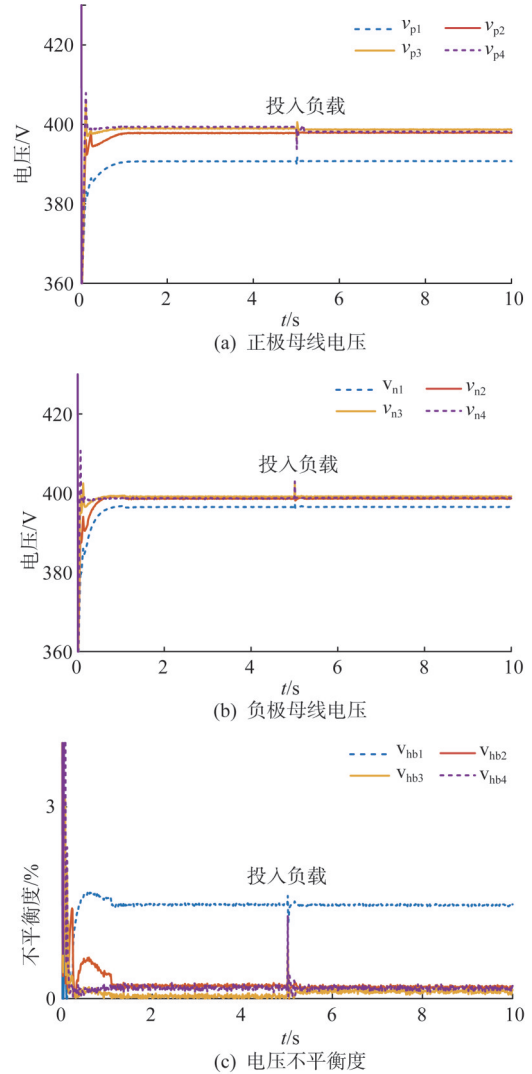


图 14 负载变动时不平衡电压控制结果

Fig. 14 Unbalanced voltage control results with load changes

3.3 不同负荷类型下控制策略的验证

所建立的系统网络模型如图 12 所示, 但每个节点的负荷类型为 ZIP 负荷。各节点的恒阻负载参数和的表 1 一致, 各节点的恒流负载和恒功率负载均为 10 A 和 10 kW。在 1 s 时节点 4 正极投入 50 Ω 的阻抗负载; 1.5 s 时节点 4 负极的恒流负载由 10 A

降低为 5 A, 2 s 时节点 1 正极的恒功率负载由 10 kW 增大为 12 kW, 图 15 为各节点的正极、负极电压和不平衡度。从图 15 可以看出, 对于 ZIP 负荷类型的网络, 无论哪种负荷类型发生变化, 本文所提的控制策略均可以有效地抑制不平衡电压, 说明了该方法具有较强的普适性。

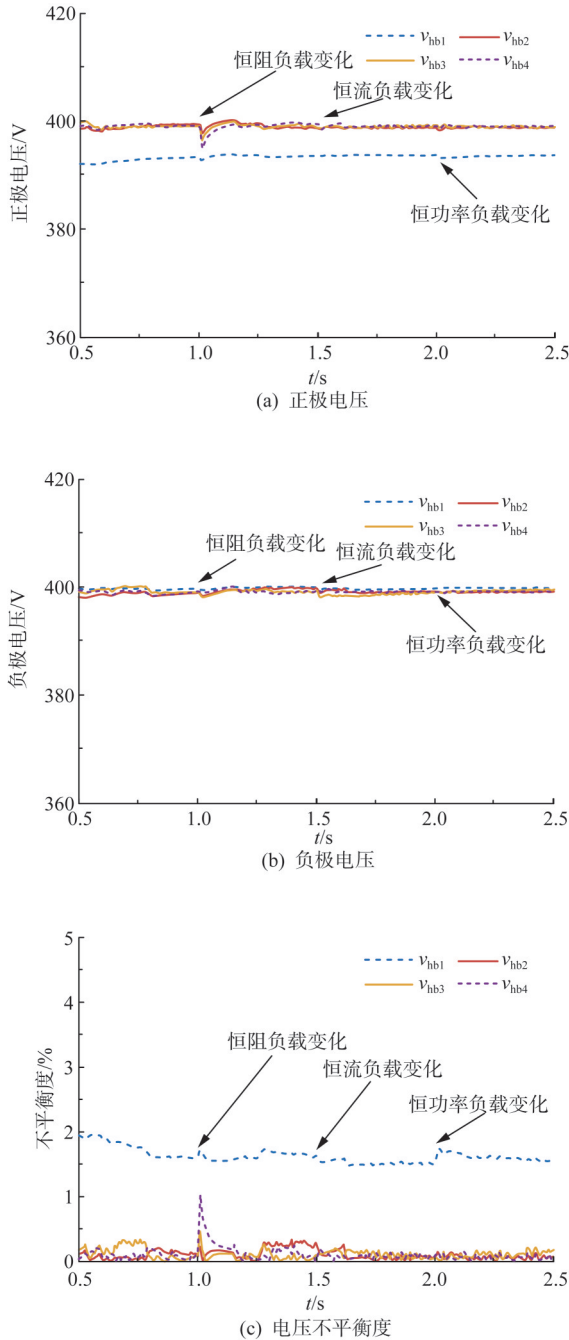


图 15 负载类型为 ZIP 时, 负载变化时的电压及其不平衡度的波形图

Fig. 15 Waveforms of voltages and its unbalance degrees during load variations for a ZIP-type load

3.4 和其他基于下垂系数修正控制策略的对比

文献[28]中将母线电压和不平衡功率作为模糊控制器输入量, 实现了储能系统的母线电压控制。为验证本文控制方案的有效性, 首先在仿真系统中仅采用电压下垂控制; 然后采用文献[28]中的模糊控制系统, 输入量不加电压不平衡度; 最后在双极直流微电网中投入本文所提出的完整控制策略, 即同时将母线电压和电压不平衡度作为模糊控制器的输入量。各仿真结果如图 16 所示。

由图 16(a)可知, 仅采用电压下垂控制时, 双极直流微电网中各节点的电压不平衡度均不同, 且第 1 节点的电压不平衡度最大, 已经非常接近 ANSI C84 建议的电压不平衡度上限 3%^[22]。由图 16(b)可知, 当采用输入量不含电压不平衡度的模糊下垂控制时, 系统中各节点的电压不平衡度得到调节, 且在限定范围内差值减小。由图 16(c)可知, 采用本节所提的模糊下垂控制策略, 即增加了电压不平衡度作为模糊控制器的输入量后, 系统各节点电压不平衡度明显发生变化, 特别是节点 1 的电压不平衡度明显下降, 且系统中各节点的电压不平衡度都保持在 3% 以内。与图 16(a)—16(b)相比, 图 16(c)的各节点的极间电压不平衡明显得到改善。

本文所提出的基于模糊算法的控制策略, 将母线电压和电压不平衡度直接作为模糊控制器的输入量, 得到改进下垂控制所需的参考电压, 实现双极直流微电网不平衡电压的控制。

3.5 天气条件对所提控制策略的影响

本文通过获取实际天气条件下的太阳辐射度数据, 分别构建了两种工况: 高辐射度和低辐射度, 采用了 24 h 的真实辐射度数据进行仿真分析, 仿真时间设置为 2.4 s。图 17(a)为高辐射度条件下的仿真结果, 图 17(b)为低辐射度条件下的仿真结果, 这些数据有效反映了光伏发电系统在不同气候条件下的运行状态。为了更加全面地验证所提控制策略的稳定性, 本文在 12:00 时进行了负荷切换, 以观察系统在负荷突变时的不平衡电压响应。

图 17 同时也展示了光伏发电功率的变化曲线, 显然光伏发电功率受辐射度波动而变化。高辐射度条件下的发电功率明显高于低辐射度条件下的发电功率, 这与实际天气条件下光伏系统的发电特性相符。对于图 17 中的系统不平衡电压的变化情况, 无论是在高辐射度还是低辐射度条件下, 不平衡电

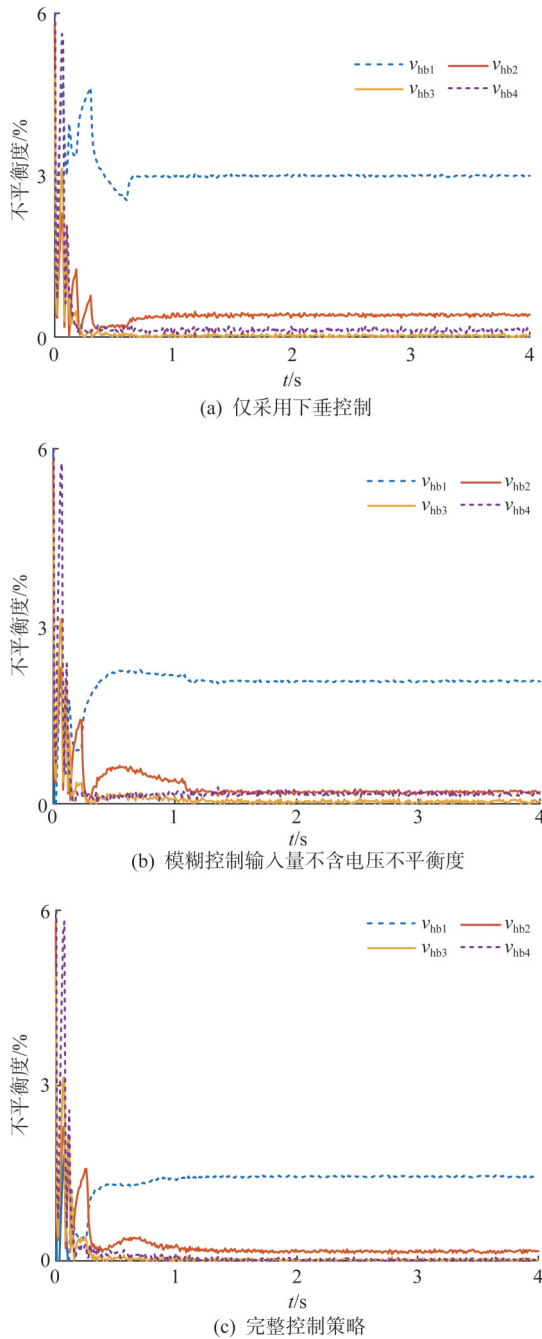


图 16 不同控制下系统电压不平衡度

Fig. 16 Voltage unbalance degrees of system under different control

压始终保持在极小的范围内波动。特别是在 12:00 负荷切换时,虽然功率发生了显著变化,但不平衡电压仍然维持在极低水平,说明系统具有较强的抗扰动能力。

通过以上仿真分析可以得出,本文提出的控制策略在不同辐射度条件下均能够保持稳定运行,且

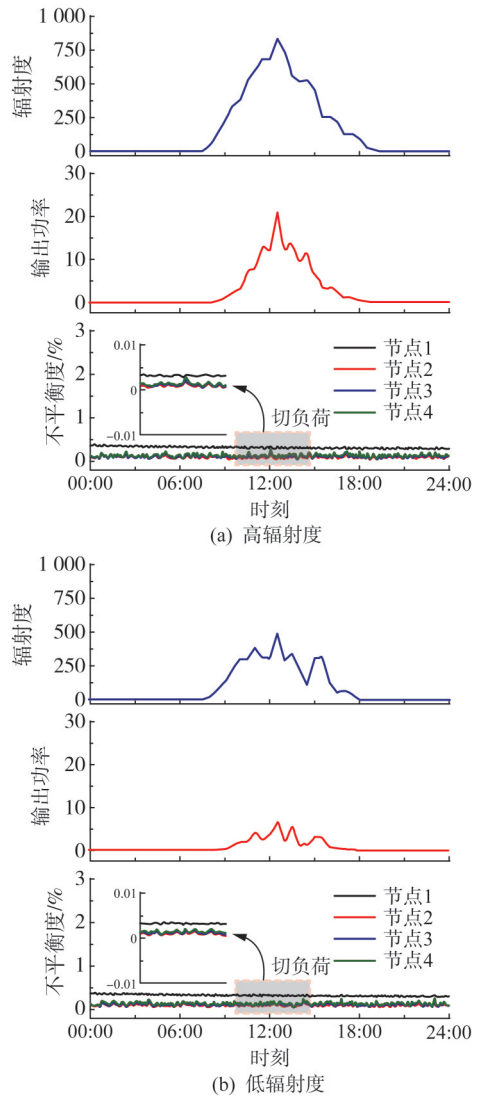


图 17 不同辐射度情况下所提控制策略的有效性验证

Fig. 17 Validation of the proposed control strategy's effectiveness under different irradiance conditions

电压不平衡度小,几乎不受外界辐射度变化的影响。这验证了所提控制策略在应对外界天气条件变化时的鲁棒性与可靠性。此外,负荷切换测试也进一步证明了系统具备良好的动态响应能力,确保了在多变工况下仍能有效调控电压不平衡。

4 结论

本文提出了一种基于模糊-下垂控制的 PEDF 双极系统极间不平衡电压抑制策略。经过理论分析和仿真实验得出结论如下。

1) 分布式电源的不平衡输出和负载的不平衡功率均会导致 PEDF 双极系统极间电压不平衡;

2) 中线电阻会加重 PEDF 双极系统的极间电压不平衡度;

3) 所提的模糊-下垂控制策略能够有效地调节 PEDF 双极系统的电压偏差, 以及由不平衡负载和中线电阻导致的极间电压不平衡, 且具有较快的响应速度。

参考文献

- [1] 曹善康, 魏繁荣, 林湘宁, 等. 网侧电压跌落下计及无功支撑效能的直流微电网多目标优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5759 – 5772.
CAO Shankang, WEI Fanrong, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimization strategy of DC microgrid based on reactive power support efficiency during voltage sag [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5759 – 5772.
- [2] LI X, GUO L, ZHANG S, et al. Observer-based DC voltage droop and current feed-forward control of a DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5207 – 5216.
- [3] GUO P, ZHANG X, YUAN Z, et al. Low-voltage DC building distribution and utilization system and its implementation in China Southern Grid [J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(3): 558 – 569.
- [4] 吴云龙, 曹晓, 李泽, 等. 面向干扰和时延的孤岛微电网二次电压与频率控制方法[J]. 南方电网技术, 2025, 19(11): 160 – 171.
WU Yunlong, CAO Xiao, LI Ze, et al. Secondary voltage and frequency control method for island microgrids facing disturbance and time-delay [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(11): 160 – 171.
- [5] 索之闻, 王智冬, 蒋维勇, 等. 具备短路电流限制能力的新能源直流汇集双极直流变换器[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 162 – 170.
SUO Zhiwen, WANG Zhidong, JIANG Weiyong, et al. A novel bipolar DC/DC converter with short-circuit limiting capability for renewable energy DC collection system [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 162 – 170.
- [6] MOON J, KIM C, PARK J, et al. Circulating current control in MMC under the unbalanced voltage [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1952 – 1959.
- [7] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066 – 3075.
- [8] ZHANG X, GONG C. Dual-buck half-bridge voltage balancer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3157 – 3164.
- [9] 李霞林, 张雪松, 郭力, 等. 双极性直流微电网中多电压平衡器协调控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 721 – 729.
LI Xialin, ZHANG Xuesong, GUO Li, et al. Coordinated control of multiple voltage balancers in a bipolar DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 721 – 729.
- [10] 汪飞, 雷志方, 徐新蔚. 面向直流微电网的电压平衡器拓扑结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1604 – 1612.
WANG Fei, LEI Zhifang, XU Xinwei. Research on topologies of voltage balancers applied in DC micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1604 – 1612.
- [11] LEE J, CHO Y, JUNG J. Single-stage voltage balancer with high-frequency isolation for bipolar LVDC distribution system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3596 – 3606.
- [12] TAN L, WU B, YARAMASU V, et al. Effective voltage balance control for bipolar-DC-bus-fed EV charging station with three-level DC-DC fast charger [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4031 – 4041.
- [13] CHEN H, CHENG P. A DC bus voltage balancing technique for the cascaded H-bridge STATCOM with improved reliability under grid faults [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 1263 – 1270.
- [14] RIVERA S, WU B. Electric vehicle charging station with an energy storage stage for split-DC bus voltage balancing [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2376 – 2386.
- [15] 江晨, 曾国宏, 吴学智, 等. 双极性直流微网的分层控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2217 – 2222.
JIANG Chen, ZENG Guohong, WU Xuezhi, et al. Hierarchical control strategy of bipolar-type DC microgrid [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2217 – 2222.
- [16] CHOUDHURY A, PILLAY P, WILLIAMSON S. Discontinuous hybrid-PWM-based DC-link voltage balancing algorithm for a three-level neutral-point-clamped (NPC) traction inverter drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3071 – 3082.
- [17] YU J, SMITH K, URIZARBARRENA M, et al. Initial designs for the ANGLE DC project; converting existing AC cable and overhead line into DC operation [C]//13th IET International Conference on AC And DC Power Transmission (ACDC 2017), February 14 – 16, 2017, Manchester, UK. London, UK: IET, 2017: 1 – 6.
- [18] LI B, TIAN H, DING L, et al. An improved three-level neutral point clamped converter system with full-voltage balancing capability for bipolar low-voltage DC grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 15792 – 15803.
- [19] LIAO J, ZHOU N, HUANG Y, et al. Unbalanced voltage suppression in a bipolar DC distribution network based on DC electric springs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1667 – 1678.
- [20] JUNG T, GWON G, KIM C, et al. Voltage regulation method for voltage drop compensation and unbalance reduction in bipolar low-voltage DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 141 – 149.
- [21] 王清末, 刘之滨, 陈炳奇, 等. 双极型 LCC-HVDC 直流系统作为黑启动电源的启动方法及策略[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 139 – 150.
WANG Qingwei, LIU Zhibin, CHEN Bingqi, et al. Startup method and strategy for bipolar LCC-HVDC system used as black-start power source [J]. Electric Power, 2024, 57(4): 139 – 150.
- [22] National Electrical Manufacturers Association. American national standard for electric power systems equipment-voltage ratings (60 Hertz): ANSI Standard C84.1 – 1995 (R2001) [S]. Rosslyn, VA, USA: National Electrical Manufacturers Association, 2006.

- [23] 李大伟, 梁得亮, 高亚晨. 一种基于模糊控制的混合式配电变压器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 696 – 703, 722.
LI Dawei, LIANG Deliang, GAO Yachen. A control strategy based on fuzzy logic control for hybrid distribution transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (S2): 696 – 703, 722.
- [24] 王强钢, 周亦尧, 廖建权, 等. 直流配电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 193 – 207.
WANG Qianggang, ZHOU Yiyao, LIAO Jianquan, et al. Review on power quality in DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (7): 193 – 207.
- [25] ZHANG X, GUO C, ZHOU Y, et al. Unbalanced voltage suppression of bipolar DC microgrids with integration of DC zero-carbon buildings [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(6): 1942 – 1956.
- [26] CHEW B, XU Y, WU Q. Voltage balancing for bipolar DC distribution grids: a power flow based binary integer multi-objective optimization approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 28 – 39.
- [27] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [28] 闫林芳, 刘巨, 石梦璇, 等. 基于模糊逻辑算法的直流微电网复合储能系统功率自适应分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2658 – 2670.
YAN Linfang, LIU Ju, SHI Mengxuan, et al. Adaptive power allocation strategy based on fuzzy logic algorithm for hybrid energy storage system in DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2658 – 2670.

收稿日期: 2024-04-25; 网络首发日期: 2025-03-25

作者简介:

谭昊(1980), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为“光储直柔”系统;

周平(1970), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为“光储直柔”系统的控制运行;

管真琪(1982), 女, 通信作者, 高级会计师, 高级经济师, 硕士, 研究方向为新型电力系统, 2365128005@qq.com。

(上接第 11 页 Continued from Page 11)

- [21] CHENG H, SHUAI Z, SHEN C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751 – 8765.
- [22] CHENG H, HUANG W, SHEN C, et al. Transient voltage stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators with induction motor loads [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4983 – 4999.
- [23] 张雪妍, 马伟明, 付立军, 等. 基于模式切换的逆变器与发电机并联控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 220 – 229.
ZHANG Xueyan, MA Weiming, FU Lijun, et al. Parallel control strategy of inverter and diesel generator based on mode-switching method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 220 – 229.
- [24] WANG G, FU L, HU Q, et al. Transient synchronization stability of grid-forming converter during grid fault considering transient switched operation mode [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1504 – 1515.
- [25] 张野, 李凌, 杨子千, 等. 大规模光伏经柔性直流送出系统交流侧故障穿越特性分析及参数优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 14 – 25, 92.
ZHANG Ye, LI Ling, YANG Ziqian, et al. AC fault ride-through characteristics analysis and parameters optimization of large-scale photovoltaic power transmission system via VSC-HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18 (3): 14 – 25, 92.
- [26] ME S P, RAUANJI M H, LEONARDI B, et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator equipped with quadrature-prioritized current limiter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 10547 – 10553.
- [27] ROKROK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 37 (2): 1519 – 1531.

收稿日期: 2024-04-11; 网络首发日期: 2024-12-10

作者简介:

蔡东晓(1993), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为柔性直流输电系统控制技术、新能源控制技术;

赵仕兴(1999), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, zhaoshixingxjtu@163.com;

李桂源(1989), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为柔性直流输电技术。