

风电接入真双极柔直系统的送端 换流器协调控制策略

李博通^{1,2,3}, 吝梦媛^{1,2,3}, 郑光辉^{1,2,3}, 董岳金^{1,2,3}, 刘轶超⁴

- (1. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津市 300072; 4. 国网天津市电力公司城东供电分公司, 天津市 300250)

摘要:【目的】采用真双极接线方式的基于模块化多电平换流器的柔性直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)技术是大规模孤岛风电场高效并网与跨区消纳的主流技术方案之一,在我国张北、江苏如东等直流输电工程广泛采用。然而,送端正负极换流器的控制策略面临平衡双极传输功率和为风电场提供稳定电压支撑的双重挑战。为此,提出了基于有功功率-频率上升/无功功率-电压下垂控制的双极换流器构网协调控制策略。【方法】分析了送端双极换流器接收的有功功率-相位-频率的耦合机理,建立了有功功率-频率上升控制策略,阐明了风电波动下双极换流器功率平衡、频率协调及容量受限工况下的自适应调节机理;揭示了送端双极换流器和风电场电压与无功的耦合关系,建立了受容量和有功功率约束的无功功率-电压下垂控制策略,研究了无功波动时交流母线电压的协调稳定机理。【结果】仿真验证表明,在系统功率波动及单极容量受限等多种情况下,所提策略能有效维持双极换流器间的功率动态均衡,并为交流系统提供稳定的电压频率支撑。【结论】所提构网协调控制策略能够有效应对孤岛风电场柔直送出系统送端双极换流器在复杂工况下的功率平衡与电压频率支撑的核心挑战,提升系统的运行稳定性。

关键词: 孤岛风电场; 柔性直流输电系统(MMC-HVDC); 送端双极换流器; 有功功率-频率上升控制; 无功功率-电压下垂控制; 协调控制策略

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)02-0014-14

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.02.002

Coordinated Control Strategy for Sending-End Converters in Wind-Integrated Real Bipolar MMC-HVDC Systems

LI Botong^{1,2,3}, LIN Mengyuan^{1,2,3}, ZHENG Guanghui^{1,2,3}, DONG Yuejin^{1,2,3}, LIU Yichao⁴

- (1. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. State Grid Tianjin Electric Power Company Chengdong Power Supply Branch, Tianjin 300250, China)

ABSTRACT: [Objective] Modular multilevel converter based high voltage direct current (MMC-HVDC) technology with a real bipolar connection is one of the mainstream technical solutions for efficient grid connection and cross-regional consumption of large-scale islanded wind farms. It has been widely adopted in HVDC projects such as Zhangbei and Rudong in Jiangsu. However, the control strategy for the sending-end positive and negative pole converters faces the dual challenge of balancing bipolar transmission power and providing stable voltage support for the wind farm. To address this, a grid-forming coordinated control strategy for bipolar converters is proposed, which combines an active power - frequency boost scheme with a reactive power - voltage droop scheme. [Methods] The coupling mechanism among active power, phase, and frequency at the sending-end bipolar converters is analyzed. An active power-frequency boost control strategy is established, clarifying the power balance and frequency coordination of bipolar converter under wind power fluctuation and the adaptive regulation

mechanism under capacity-limited conditions. The coupling relationship between the voltage and reactive power of the sending end converters and wind farm is revealed. A reactive power-voltage droop control strategy with capacity and active power constraints is established. The coordinated stability mechanism of AC bus voltage under reactive power fluctuation is investigated. [Results] Simulation results demonstrate that the proposed strategy can effectively maintain dynamic power balance between the bipolar converters and provide stable voltage and frequency support for the AC system under various conditions, including system power fluctuations and single-pole capacity limitations. [Conclusions] The grid-forming coordinated control strategy proposed can effectively address the core challenges of power balance and voltage and frequency support for the sending-end bipolar converters in islanded wind farm MMC-HVDC systems under complex operating conditions, thereby improving the operation stability of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U2166205).

KEYWORDS: islanded wind farm; modular multilevel converter based high voltage direct current (MMC-HVDC); sending-end bipolar converters; active power-frequency rise control; reactive power-voltage droop control; coordinated control strategy

0 引言

大力发展可再生能源是应对化石能源衰竭危机、实现能源结构转型的全球共识^[1-2]。依托显著的资源禀赋优势,中国西北“沙戈荒”地区正被重点建设为大型新能源基地,以有力支撑新能源规模化开发和利用^[3]。“沙戈荒”地区地处偏远,本地负荷匮乏,区域交流电网缺乏传统火力发电机组等同步电源支撑,属于典型的送端孤岛式新能源系统,需要通过特高压远距离输电方式将电力输送至东部负荷中心^[4-6]。在此背景下,基于模块化多电平换流器的柔性直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)技术因具备稳定的电压支撑能力、不受换相条件限制等优势,已成为实现大规模孤岛风电集群高效并网与跨区消纳的主流技术方案之一^[7-12]。MMC-HVDC主要采用伪双极与真双极2种接线方式。相较于伪双极系统中的单换流器配置方案^[13-14],真双极系统在每个换流站配置正、负极2套独立换流器,在提升系统传输容量的同时增强了其多目标协调控制能力,在大容量电能外送中具有经济灵活、可靠性高的优势,已在我国张北、白鹤滩等直流输电工程中广泛使用^[15-17]。

在孤岛风电外送场景中,送端MMC换流站的控制策略面临两大技术挑战:一方面,风电出力波动性强^[18-19],若双极换流器采取灵活性较弱的控制策略,则可能引发正负极直流线路间的功率不平衡问题,进而产生附加损耗与设备过载风险;另一方面,风电场自身调压能力弱,交流母线电压失稳风险大。因此,需要对送端双极换流器的功率平衡与电压支撑方法控制策略进行研究,以保障孤岛风电柔直送出系统的安全稳定运行。

当前,针对送端换流站的功率平衡与电压支撑

控制策略包含主从控制与对等控制2类。主从控制方案,即一极换流器采取定交流电压和频率控制(简称VF控制)支撑电压,另一极换流器采取有功无功解耦控制(简称PQ控制)调节功率平衡的控制策略,其核心挑战在于维持双极功率平衡和电压稳定的鲁棒性不足。针对此问题,文献[20]提出通过梯度法将有功功率参考值设为换流站实时总传输功率的一半,以实现正负极传输有功功率的动态平衡。然而,该方法未验证特殊工况下PQ控制极直接切换为VF控制时的交直流电压稳定性。文献[21]针对控制策略切换时的稳定性问题,提出了基于电流跟随的软切换控制模型,有效降低了控制策略切换时的电压波动,但其正常运行时,风电场功率波动主要由VF控制极承担,双极功率难以实现动态平衡。总体而言,主从控制方案不仅需考虑特殊工况下的控制切换稳定性问题,而且在风电功率频繁波动的情况下难以维持双极直流线路的功率平衡。

第二类控制策略为对等控制,即双极换流器均采用VF控制等具有电压-频率支撑能力的构网型控制策略。相较于主从控制,该策略通过双极共同提供电压-频率支撑,显著增强了系统强度,并更易实现正负极直流网络的动态功率平衡。文献[22-23]主要研究了风电场与送端换流器的协调控制策略,在系统正常运行时正负极换流器均采用VF控制。文献[24-25]研究了利用储能系统、风电场及换流器之间的协调控制,系统正常运行时正负极换流器同样采用VF控制策略。然而,文献[22-25]中的方案对数据一致性和控制精度要求较高,由于正负极换流器的控制目标相同,因此微小的目标值偏差便可能造成正负极换流器协调失衡,进而带来系统稳定性风险。文献[26]在稳态运行工况下,采用P-f/V下垂控制策略实现双极换流器有功功率与频率的协同调节。文

献[27]研究了多个新能源场站经公共交流母线并网的拓扑结构,通过对2个换流器采用 P - f/V 下垂控制,实现有功功率均衡与母线电压稳定。但文献[26-27]均未提及无功功率的动态调节与电压的协同控制。文献[28]基于同步发电机的有功-频率下垂特性,构建了双极换流器 P - f/Q - V 下垂控制策略以实现电压及频率稳定,但未充分考虑送端换流器在风电并网场景中主要承担接收风电场输出的有功功率的负荷特性,导致控制策略适应性不足。文献[29]采用 P - f/Q - V 下垂控制策略实现双极换流器之间有功功率及无功功率的协调,但其有功/无功正方向定义及下垂特性曲线不明,难以清晰判断其控制策略下有功功率与频率、无功功率与电压之间的调节机制。综上所述,现有文献中对于连接新能源场站的送端双极换流器下垂控制中所隐含的因果关系、作用机理和深层本质的讨论仍较为匮乏。另外,现有文献中多针对送端双极换流器最大传输容量相同的工况开展研究,尚未充分探讨双极换流器因自身设备限制等原因导致最大传输容量不一致时的协调控制策略,该工况下的控制适应性与鲁棒性仍有待进一步探讨。

针对风力波动时双极换流器平衡正负极线路传输功率的需求以及双VF控制目标存在偏差时双极换

流器之间频率电压无协调产生的稳定问题,本文开展真双极双端柔性直流输电系统的送端正、负极换流器之间的协调控制策略研究。首先,基于风电经真双极柔直送出系统的送端电路结构,分析风电场传输至送端换流器的有功功率与频率的耦合机理,研究有功功率-频率上升特性的送端换流器功率平衡控制策略;其次,基于送端换流器输出的无功功率与电压幅值的耦合关系,研究基于无功功率-电压下垂特性的送端换流器电压支撑控制策略,并根据换流器中有功功率与无功功率的受限关系确定无功功率-电压下垂系数;最后,通过在PSCAD/EMTDC中搭建真双极双端MMC-HVDC系统的仿真模型,对有功功率-频率上升/无功功率-电压下垂控制策略的有效性进行验证。

1 正负极 MMC 换流器有功-频率协调控制策略

风电场至送端换流站的简化电路拓扑结构如图1所示。风电场送出的有功功率通过交流线路汇集至公共耦合点(point of common coupling, PCC),经送端换流站整流后通过直流输电线路送至受端换流站,经受端换流站逆变连接至交流电网。

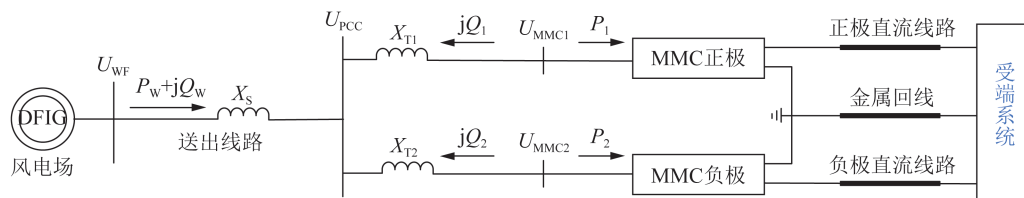


图1 真双极 MMC-HVDC 送端系统结构

Fig. 1 Structure of sending system of real bipolar MMC-HVDC

图1中: U_{WF} 为风电场出口电压; P_W 、 Q_W 分别为风电场输出的有功功率、无功功率; U_{PCC} 为交流母线电压; U_{MMC1} 、 U_{MMC2} 分别为正、负极换流器交流出口电压; P_1 、 P_2 分别为正、负极换流器交流侧流入的有功功率; Q_1 、 Q_2 分别为正、负极换流器交流侧输出的无功功率; X_s 为风电场至送端换流站之间的线路电抗; X_{T1} 、 X_{T2} 分别为正、负极换流器变压器的等效电抗,二者一般相等。

为保证孤岛风电外送系统的稳定运行,送端正、负极换流器需共同为风电场提供频率和电压参考,并协调正、负极的有功和无功分配问题。风机侧换流器一般采用基于最大功率点跟踪的控制策略,通过实时调整其相对于PCC的电压相位将风机发出的全部有功功率注入送端换流站。因此,送端正、负极换流器有功控制策略的核心问题为通过分别控制各自的相位,对风电场传输至送端换流站的总有功功率在正、负极之间进行协调分配。

1.1 送端 MMC 换流器有功功率-频率耦合特性

由于高压输电线路的电阻远小于电抗,图1所示的简化等效电路中忽略了输电线路的电阻,风电场至正、负极换流器之间的电路可视为星形电路,为进行潮流计算,经星三角变换后变换为三角形等效电路,如图2所示。

根据星形电路变换为三角形电路的阻抗变换公式可以得到,图2中各个电压节点之间的等效电抗表达式为:

$$\begin{cases} X_1 = \frac{X_s X_{T1} + X_s X_{T2} + X_{T1} X_{T2}}{X_{T2}} \\ X_2 = \frac{X_s X_{T1} + X_s X_{T2} + X_{T1} X_{T2}}{X_{T1}} \\ X_3 = \frac{X_s X_{T1} + X_s X_{T2} + X_{T1} X_{T2}}{X_s} \end{cases} \quad (1)$$

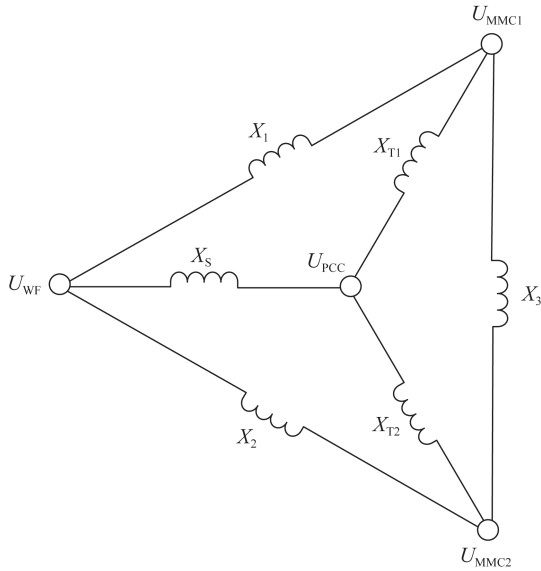


图 2 星三角等效电路变换

Fig. 2 Star-delta equivalent circuit transformation

式中: X_1 为风电场至正极换流器的等效电抗; X_2 为风电场至负极换流器的等效电抗; X_3 为正负极换流器之间的等效电抗。

送端正负极换流器接收的有功功率近似与等效线路电抗成反比, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U_{WF} U_{MMC1} \sin(\theta_{WF} - \theta_{MMC1})}{X_1} \\ P_2 = \frac{U_{WF} U_{MMC2} \sin(\theta_{WF} - \theta_{MMC2})}{X_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_{WF} 为风电场出口处的电压相位; θ_{MMC1} 、 θ_{MMC2} 分别为正、负极换流器的交流电压 U_{MMC1} 与 U_{MMC2} 的相位。

由式(2)可知, 正负极换流器接收到的有功功率与其交流电压相位相关, 在风电场稳定功率输出即电压相位 θ_{WF} 确定及正、负极换流器交流电压幅值 U_{MMC1} 与 U_{MMC2} 相等的情况下, 当某极换流器交流侧电压的相位增大时, 换流器接收的有功功率将相应减少。

当系统处于功率变化或波动的情况下, 送端正负极换流器可通过对各自频率的调节实现对其交流电压相位的调整, 其相位与频率的关系为:

$$\begin{cases} \theta_{MMC1} = \int 2\pi f_1 dt + \theta_0 \\ \theta_{MMC2} = \int 2\pi f_2 dt + \theta_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_1 、 f_2 分别为正、负极换流器各自的交流电压频率; θ_0 为正负极换流器交流电压的初始相位。

由式(3)可知, 送端换流站中某极换流器频率升高时, 其交流电压相位会逐渐增大, 由式(2)可知其接收到的有功功率会逐渐减少; 反之, 某极换流器频

率降低时, 其交流电压相位会逐渐减小, 接收到的有功功率会逐渐增大。

因此, 当正负极换流器因风电场输出功率波动等情况出现不平衡时, 可通过调节各自的频率以实现功率再平衡。对于当前接收功率较大的一极换流器, 通过提升其频率从而减小其接收的有功功率, 同时使频率随着有功功率的减小而相应回降; 对应接收功率较小的一极, 则通过降低其频率, 进而增大其接收的有功功率, 同时使频率随着有功功率的增大而相应回升。最终实现正负极换流器稳定在传输相同有功功率的运行状态。在此过程中, 双极换流器的频率会出现短时微小差异, 但在功率趋同的过程中二者的频率也逐渐趋于相同, 实现双极换流器的同频平衡运行。

基于上述有功功率-频率调节机理, 建立送端换流器的有功功率-频率(P - f)响应方程, 如式(4)所示。

$$f_i = f_{\min} + k_{P_i}(P_i - P_{\min i}), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中: f_{\min} 为送端系统频率允许的最小值^[30]; P_1 、 P_2 分别为正、负极换流器的实际传输功率; $P_{\min 1}$ 、 $P_{\min 2}$ 分别为正、负极换流器的最小传输功率, 规定流入换流器交流侧的有功功率方向为正; k_{P_1} 、 k_{P_2} 分别为正、负极换流器 P - f 响应方程的调节系数, 取值为正。

$$k_{P_i} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{P_{\max i} - P_{\min i}}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

式中: f_{\max} 为送端系统频率允许的最大值^[30]; $P_{\max 1}$ 、 $P_{\max 2}$ 分别为正、负极换流器的最大传输功率。

式(4)对应的有功功率-频率上升特性曲线如图 3 所示。送端正负极换流器均采用有功功率-频率上升特性控制时, 其控制框图如图 4 所示。

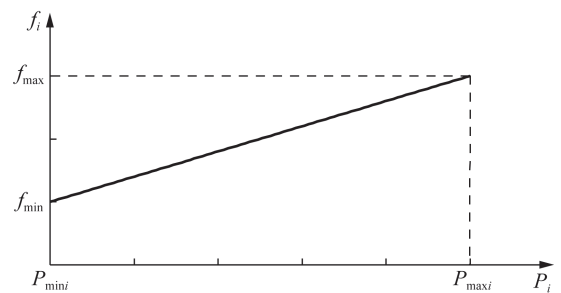


图 3 送端换流器有功功率-频率上升特性曲线

Fig. 3 Active power-frequency rise characteristic curve of sending converter

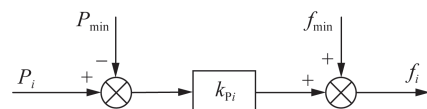


图 4 有功功率-频率上升特性控制框图

Fig. 4 Active power-frequency rise characteristic control block diagram

送端正负极换流器采用图 4 的控制策略时所使用的参数将在 1.2 节中进行详细说明。

1.2 风电场功率波动时正、负极换流器的有功功率平衡策略

正常运行工况下,送端换流站应使正、负极换流器应尽可能平均分配风电场传输至换流站的有功功率,实现系统对称运行,避免金属回线的不平衡电流。因此,正常运行时正、负极换流器的有功功率-频率上升特性曲线参数相同,即 $k_{p1}=k_{p2}=k_p$ 。

$$\begin{cases} f_1 = f_{\min} + k_p(P_1 - P_{\min}) \\ f_2 = f_{\min} + k_p(P_2 - P_{\min}) \end{cases} \quad (6)$$

风电场输出的功率波动期间,采用有功功率-频率上升控制的正、负极换流器具有平衡极间传输有功功率的能力,具体的功率平衡原理分析如下:

假设在初始稳定状态下,正、负极换流器的有功功率 P_1 和 P_2 分配相等,交流频率保持一致。当风电场输出的有功功率在某一时刻增大时,正、负极换流

器将共同接收到更大的有功功率,并经历暂态调节过程以实现新的功率分配。在暂态过程中,若正、负极换流器接收的有功功率 P_1 和 P_2 不一致,根据式(4)中频率和有功功率的正相关关系,二者的交流频率 f_1 和 f_2 将会出现差异,当正极换流器接收到的有功功率 P_1 高于负极换流器接收到的有功功率 P_2 时,其频率 f_1 将高于负极换流器的频率 f_2 ;结合式(3)中频率与相角的积分关系,正极换流器交流电压相位 θ_{MMC1} 也将超前于负极换流器 θ_{MMC2} 。进一步依据式(2)中有功功率与相位差的关系,正极换流器因相位差变小而降低接收到的有功功率 P_1 。调节过程中,正负极换流器通过频率-相位-功率之间形成的负反馈关系,实现了有功功率在换流器间的动态平衡,并稳定运行于新的频率点。若正极换流器接收功率小于负极,有功功率动态平衡过程与上述机制类似。

风电场功率波动时正负极换流器有功功率平衡的完整过程如图 5 所示。

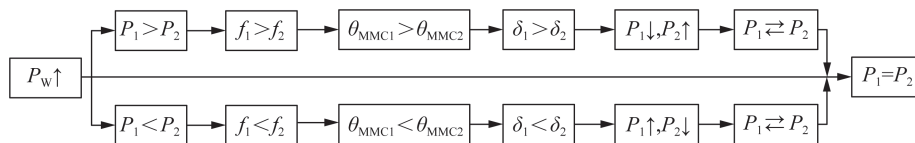


图 5 正、负极换流器有功功率平衡过程

Fig. 5 Active power balance process of positive and negative converter

风电场输出的有功功率减小时,正、负极换流器平衡传输的有功功率机理与上述分析类似,不再赘述。

1.3 正、负极换流器频率存在初始值偏差时双极换流器频率协调原理

实际工程中,受设备误差影响,正、负极换流器设定的频率初始值虽相同,其实际接收值仍可能存在微小差异。当正、负极换流器均采用 1.1 节所提的有功功率-频率上升控制策略时,正、负极换流器可通过动态协调各自传输的有功功率,实现对交流频率的自适应调节,从而逐步缩小正、负极换流器的交流频率差异,促使系统趋于同步稳定。这一过程的详细解释为:

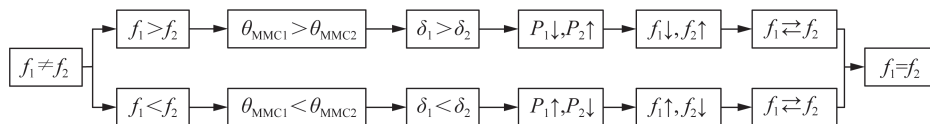


图 6 正、负极换流器交流频率协调过程

Fig. 6 AC frequency coordination process of positive and negative converter

1.4 特殊工况下双极换流器的有功功率协调控制策略

当某一极换流器因元件老化、散热能力下降等

原因导致其最大传输容量下降时,系统将面临 2 个换流器传输能力不等的运行工况。此时,若正、负极换流器仍采用式(6)所示的有功功率-频率响应方程进

行控制,当风电场传输至双极换流器的总有功功率超过容量受限极最大允许传输容量的2倍时,受限极换流器将面临功率越限风险,严重情况下可能触发换流器闭锁,威胁电力系统的安全稳定运行。

为尽量实现直流侧功率平衡并避免上述功率越限问题,此种工况下理想的控制策略为受限极换流器接收功率达到其最大传输容量时,保持该极功率恒定,多余功率全部由正常极换流器消纳,双极换流器的有功功率-频率上升特性曲线如图7所示。此控制策略下,受限极换流器的传输功率达到上限后,控制模式由 P - f 上升/ Q - U 下垂控制切换为 PQ 控制,以维持其最大功率输出。然而,该策略在运行至限值时的控制模式强制切换不仅会引入较大的暂态波动,而且有可能导致系统失稳。此外, PQ 控制模式下,换流器需依赖锁相环跟随系统频率,其动态响应性能受限于锁相环(phase locked loop, PLL)的带宽。

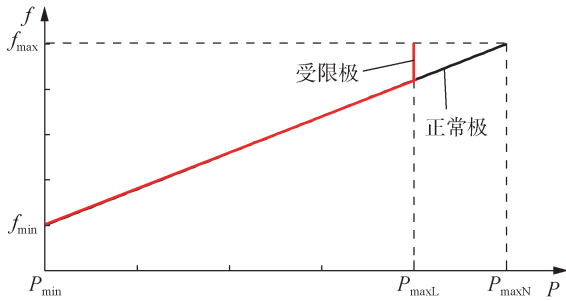


图7 理想控制策略下正负极换流器有功功率-频率上升特性曲线

Fig. 7 Active power-frequency rise characteristic curve of positive and negative converter with ideal control strategy

因此,在不改变正、负极换流器有功功率-频率上升特性曲线形态与控制策略的前提下,本文采用仅依据受限极换流器实时接收功率,动态调整其有功功率-频率响应方程调节系数的方法,以避免功率达到上限时控制策略大幅切换带来的负面作用。在该方法中,正常极换流器有功功率-频率方程的调节系数保持不变,受限极换流器则采用分段调节系数,在其接收功率较小时,其调节系数与正常极保持一致,以实现正负极直流网络间的功率平衡;在其接收功率接近其最大传输容量时,其调节系数增大,以减少其接收的有功功率,避免功率越限。

基于式(5),正常极调节系数可表述为:

$$k_{PN} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{P_{\max N} - P_{\min}} \quad (7)$$

式中: k_{PN} 为正常极换流器 P - f 响应方程的调节系数; $P_{\max N}$ 为正常极换流器的最大传输容量; P_{\min} 为双极换流器的最小传输容量。

容量受限极的调节系数分为2段:第一段与正常

极相同,功率调节范围为其最小值 P_{\min} 至拐点值 P_{tur} ;第二段显著增大,功率调节范围为拐点值 P_{tur} 至最大值 $P_{\max L}$,计算式为:

$$k_{PL} = \begin{cases} k_{PN}, & P_F \leq P_{\text{tur}} \\ \frac{f_{\max} - f_{\text{tur}}}{P_{\max L} - P_{\text{tur}}}, & P_F > P_{\text{tur}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_{PL} 为容量受限极换流器 P - f 响应方程的调节系数; $P_{\max L}$ 为容量受限极换流器的最大传输容量; P_{tur} 为容量受限极换流器调节系数调整的有功功率拐点值; f_{tur} 为容量受限极换流器调节系数调整的频率拐点值。

其中,有功功率拐点值 P_{tur} 与最大传输容量 $P_{\max L}$ 相关,其表达式为:

$$P_{\text{tur}} = k_L P_{\max L} \quad (9)$$

式中: k_L 为容量受限极换流器的拐点系数,取值为0.90~0.95。

依据式(7)、式(8)和式(9),某极换流器容量受限工况下双极换流器的有功功率-频率响应方程式为:

$$\begin{cases} f_N = f_{\text{tur}} + k_{PN}(P_N - P_{\text{tur}}) \\ f_L = f_{\text{tur}} + k_{PL}(P_L - P_{\text{tur}}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_N 、 f_L 分别为正常极、受限极换流器的实际交流频率; P_N 、 P_L 分别为正常极、受限极换流器传输的实际有功功率。

式(10)对应的有功功率-频率上升特性曲线如图8所示。曲线分为 AB 和 BC 两段, AB 段曲线和正常极的上升特性曲线完全一致, BC 段曲线的调节系数明显变大。

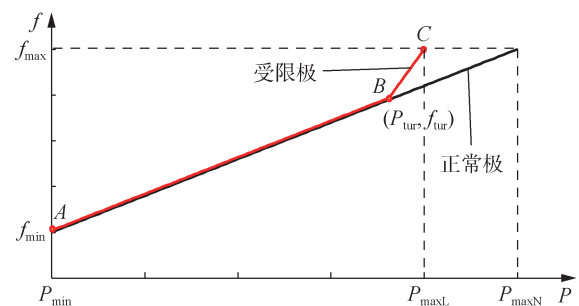


图8 容量受限下正负极换流器有功功率-频率上升特性曲线
Fig. 8 Active power-frequency rise characteristic curve of positive and negative converter under capacity limitation

由图8可知,当受限极换流器接收到的有功功率 P_L 低于预设的有功功率拐点值 P_{tur} 时,双极换流器的有功功率-频率响应方程一致,双极传输的有功功率保持平衡。当受限极换流器接收到的有功功率 P_L 超过拐点值 P_{tur} 时,受限极换流器的有功功率-频率响应方程的调节系数增大,依据式(10)可知,双极换流器

传输功率相同时受限极换流器的频率将大于正常极,由式(3)得,受限极换流器的电压相位将大于正常极。由式(2)可知,由于相位变大,流入受限极的有功功率将会减少,而流入正常极的将会增大。因此由式(10)得,受限极的频率将会随功率减小而减小,正常极的频率将会随功率增大而增大,最终双极换流器的频率将会趋于相同。由图 8 可得,BC 段双极换流器的频率相同时,受限极的传输功率一定会低于其最大传输容量,从而有效抑制其功率越限风险。

值得关注的是,有功功率拐点值 P_{lim} 的设定将直接影响系统运行特性。由图 8 可得, P_{lim} 越大,则功率平衡段 AB 越长,功率不平衡段 BC 越短,有利于维持更多运行情形下的功率平衡,但是 P_{lim} 过大时,BC 段直线接近垂直,导致系统调节裕度不足,功率波动将直接引发频率在最大值附近持续震荡,严重影响系统稳定性。因此,为兼顾功率平衡广度和系统稳定需求,本文将拐点值 P_{lim} 的取值范围限定于 $0.90P_{\text{maxl}} \sim 0.95P_{\text{maxl}}$ 之间。

2 正负极 MMC 换流器无功-电压协调控制策略

图 1 所示的真双极 MMC-HVDC 送端系统中,送端换流站需承担电力线路及变压器等元件消耗的部分无功功率^[31],因此呈现无功电源特性。换流站的总无功出力由系统需求决定,即在电网参数固定的情况下,会受风电场输出有功和无功的共同影响。因此,送端 MMC 换流站无功功率-电压调节的核心目标是确保 PCC 电压在合理范围内的同时动态响应系统无功需求的变化。

送端双极换流器均采用 VF 控制策略时,正负极换流器通过设置相同的交流母线电压参考值来共同保证 PCC 电压稳定,如图 9 所示。

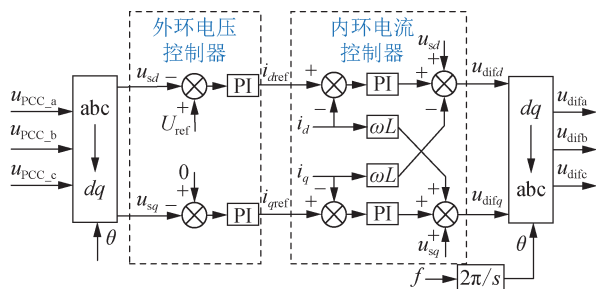


图 9 VF 控制框图

Fig. 9 VF control block diagram

图 9 中: θ 为 dq 轴旋转坐标系的旋转角速度,由给定频率 f 经积分环节生成; u_{sd} 、 u_{sq} 为三相交流母线

电压 u_{pcc_i} ($i=a, b, c$) 经 Park 正变换后的 d, q 轴电压分量,其指令值分别为定值 U_{ref} 和 0; i_d, i_q 分别为换流器交流出口电流经 Park 正变换后的 d, q 轴电流分量,其指令值分别为外环电压控制器的输出 $i_{d\text{ref}}$ 和 $i_{q\text{ref}}$; ω 为电网角频率; L 为换流器的交流等效电感; $u_{\text{did}}, u_{\text{diq}}$ 分别为内环电流控制器的输出电压,经 Park 逆变换后生成换流器的三相调制波 u_{dif_i} ($i=a, b, c$), 调制换流器的交流出口电压。

VF 控制策略下换流器的电压-无功调节曲线如图 10 所示。

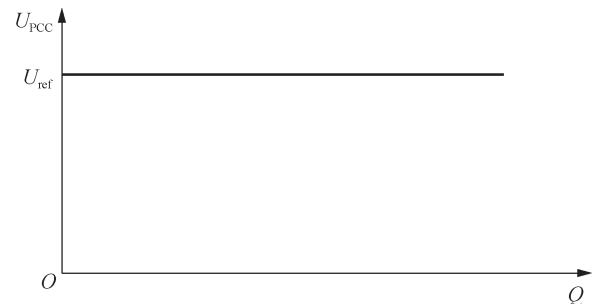


图 10 VF 控制下的无功-电压调节曲线

Fig. 10 Reactive power-voltage regulation curve with VF control

由图 10 可知,在 VF 控制策略下,无论系统无功需求如何变化,交流母线电压幅值均可维持恒定,系统所需的无功功率则由各换流器通过独立调节其交流出口电压来满足。然而,考虑测量误差、通信延迟及计算偏差等因素的存在,实际两极换流器电压-无功控制系统的电压参考值出现轻微差异,此时双方按照各自的控制目标进行调节却又始终无法达成一致,交流母线电压将出现一直波动而无法稳定的情况,甚至诱发控制系统振荡放大出现失稳问题。此外,该控制模式本身不具备调节两极换流器各自输出无功功率比例的能力。

为解决正负极换流器的电压及无功协调问题,本文提出一种基于无功功率-电压关系的下垂控制策略,以替代传统的 VF 控制方法,实现正负极换流器的电压协同稳定与无功功率分配。

2.1 送端 MMC 换流器无功功率-电压耦合特性

送端正负极换流器的无功功率输出特性为:

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{U_{\text{MMC1}}(U_{\text{MMC1}} - U_{\text{WF}})}{X_1} \\ Q_2 = \frac{U_{\text{MMC2}}(U_{\text{MMC2}} - U_{\text{WF}})}{X_2} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知,送端正、负极换流器的无功输出通过调节各自的交流出口电压 U_{MMC1} 和 U_{MMC2} 实现,出

口电压较高的一极将输出更大的无功功率。

分析图 9 的控制环节可知,当正负极换流器的 PCC 电压参考值 U_{ref} 不同时,参考值较高的一极换流器其调制波电压幅值将大于另一极。因此,该极换流器的交流出口电压相应更大,结合式(11)所示的换流器无功功率输出特性,其输出的无功功率输出亦将增大。此时,若将换流器的 PCC 电压参考值设定为与其输出的无功功率呈负相关关系,则无功功率输出较大的一极换流器的电压参考值相应降低。此负反馈机制可使正负极换流器的交流母线电压参考值逐渐趋于一致,实现交流母线 PCC 电压稳定。

基于上述无功功率-电压的调节机理,建立送端换流器的无功功率-电压($Q-U$)响应方程,如式(12)所示。

$$\begin{cases} U_{ref1} = U_{min} - k_{Q1}(Q_1 - Q_{min1}) \\ U_{ref2} = U_{min} - k_{Q2}(Q_2 - Q_{min2}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: U_{ref1} 、 U_{ref2} 分别为双极换流器控制系统设定的交流母线电压幅值参考值,即期望控制目标; U_{min} 为系统运行时并网点电压允许的最小值^[30]; Q_1 、 Q_2 分别为正、负极换流器的实际输出无功功率; Q_{min1} 、 Q_{min2} 分别为正、负极换流器的最小输出无功,规定以流出换流器交流侧为正方向; k_{Q1} 、 k_{Q2} 分别为正、负极换流器 $Q-U$ 方程的调节系数,取值为正。

$$k_{Qi} = \frac{U_{max} - U_{min}}{Q_{maxi} - Q_{mini}}, \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

式中: U_{max} 为系统运行时并网点电压允许的最大值^[30]; Q_{max1} 、 Q_{max2} 分别为正、负极换流器的最大输出无功功率。

正常运行状态下,送端正、负极换流器应优先保证传输有功功率,其输出的最大无功功率受到换流器额定容量及传输有功功率的约束,同时由于送端换流器呈现无功电源特性,其输出的最小无功功率一般为 0。

$$\begin{cases} Q_{maxi} = \sqrt{S_i^2 - P_i^2}, \quad i = 1, 2 \\ Q_{mini} = 0, \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: S_i 为正负极换流器的额定容量; P_i 为正负极换流器实时传输的有功功率。

式(12)对应的无功功率-电压下垂特性曲线如图 11 所示。由图 11 可得,正、负极换流器输出无功功率的最大值相同时,其 $Q-U$ 下垂特性曲线相同,稳态运行时实际输出的无功功率相同;输出无功功率的最大值不同时,其 $Q-U$ 下垂特性曲线不同,稳态运行时实际输出的无功功率也不相同。送端正、负极换流器的无功功率-电压下垂控制框图如图 12 所示。

通过将图 12 所示的无功功率-电压控制框图和

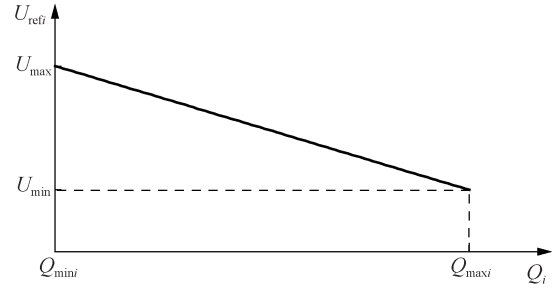


图 11 送端换流器无功功率-电压下垂特性曲线

Fig. 11 Reactive power-voltage droop characteristic curve of sending converter

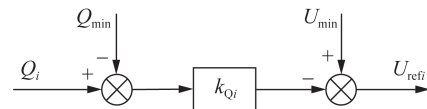


图 12 无功功率-电压下垂控制框图

Fig. 12 Reactive power-voltage droop characteristic control block diagram

图 4 所示的有功功率-频率控制框图引入图 9 所示的 VF 控制框图中,本文所提的 $P-f$ 上升/ $Q-U$ 下垂控制策略的完整控制框图如图 13 所示。

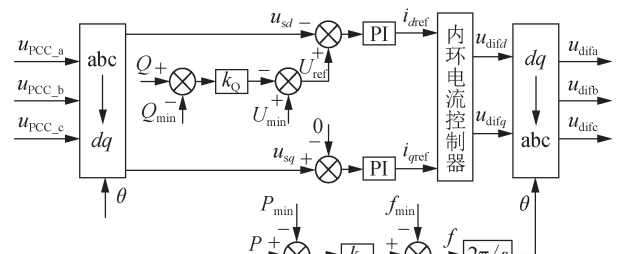


图 13 送端换流站 $P-f$ 上升/ $Q-U$ 下垂控制框图

Fig. 13 $P-f$ rise / $Q-U$ droop control block diagram of sending end converter station

2.2 送端 MMC 换流站输出无功功率波动时双极换流器的电压控制目标协调分析

当风电场输出的无功功率增加时,送端正、负极换流器输出的无功功率需求相应减少,系统的无功平衡状态被改变。在此过程中,基于无功功率-电压下垂特性的双极换流器协调控制机制可实现交流母线电压的暂态同步调节,其动态调节机理可通过下垂特性曲线与换流器输出的无功功率和电压的关系阐明。

假设正、负极换流器在初始稳定状态下,输出的无功功率满足系统需求,且正负极换流器的交流母线电压参考值 U_{ref1} 和 U_{ref2} 一致。当系统的无功平衡状态改变时,在正负极换流器输出无功功率变化的过程中,控制环节的响应差异可能导致在达到稳定运行的过程中正负极换流器的交流母线电压控制目标参考值产生偏差。在这一过程中,当正极换流器的交流母线电压参考值 U_{ref1} 大于负极换流器 U_{ref2} 时,根

据图 13 的控制环节可得,正换流器的交流出口电压 U_{MMC1} 将高于负换流器 U_{MMC2} ;由式(11)所示的换流器无功功率传输方程,正换流器输出无功功率 Q_1 将大于负换流器输出无功功率 Q_2 。继而,基于式(12)所示的下垂控制, U_{ref1} 的上升速率将小于 U_{ref2}

的上升速率。此调节机制使得正、负换流器的交流电压控制目标 U_{ref1} 和 U_{ref2} 逐渐趋于一致,实现交流母线电压的稳定。

送端换流站输出的无功功率波动时电压控制目标协调一致的完整过程如图 14 所示。

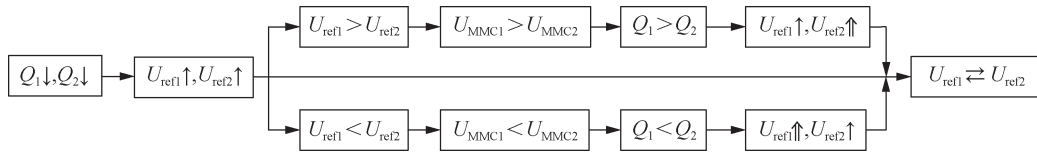


图 14 正、负换流器电压控制目标协调一致过程

Fig. 14 Positive and negative converter voltage control target coordination process

3 仿真验证

为验证本文所提送端正负极换流器协调控制策略的有效性,以双馈异步风力发电

机接入的双端真双极 MMC-HVDC 系统为例,在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建了如图 15 所示的包含风电场接入的双端 MMC-HVDC 仿真系统。

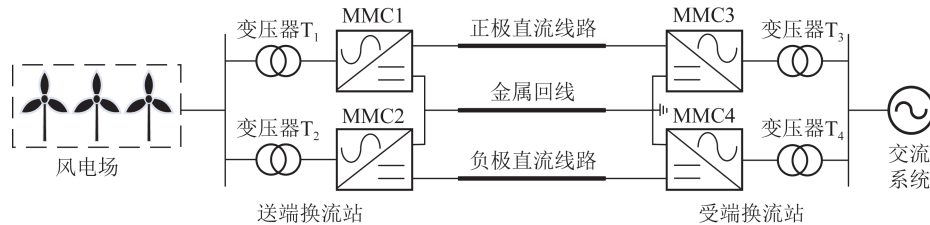


图 15 风电场接入的双端 MMC-HVDC 系统示意图

Fig. 15 Schematic diagram of two-terminal MMC-HVDC system with wind farm integration

其中,连接风电场的送端正、负极换流器 MMC1、MMC2 均采用有功功率-频率上升/无功功率-电压下垂控制策略;连接交流电网的受端正、负极换流器 MMC3、MMC4 均采用定直流电压、定无功功率控制^[32-33]。仿真参数见表 1。

表 1 换流站的额定参数

Table 1 Rated parameters of converter station

参数	取值
额定交流母线电压/kV	230
变压器额定变比	230 kV/175 kV
额定功率/MW	1200
额定直流电压/kV	±500

3.1 算例 1:风电场有功出力波动工况下所提控制策略的有效性验证

为验证所提双极换流器协调控制策略在风电场有功功率波动下的性能,本节设计以下仿真算例,初始为稳定运行状态,风电场输出的有功功率为 800 MW, $t=0.5$ s 时施加功率扰动,使风电场输出的有功功率增加至 1000 MW,仿真结果如图 16 所示。

图 16 的仿真结果表明,当风电场输出有功功率由 800 MW 增加至 1000 MW 时,采用 $P-f$ 上升/ $Q-U$ 下

垂控制策略的送端正、负极换流器表现出了卓越的协调控制性能。该双极换流器能够根据风电场实时出力的动态变化,迅速且精准地调整其各自传输的有功功率。并且在此主动调节过程中,始终保持了高度的协同,有效地维持了正、负极直流网络之间的有功功率平衡状态,避免了因功率分配不均可能导致的系统失稳问题。与此同时,在此较大幅度的有功功率扰动下,风电场并网点交流母线电压展现出了较高的稳定性,其电压波动范围被严格限制在 $\pm 3\%$ 的极小幅度之内。

由此表明,本文所提针对 MMC-HVDC 系统中送端换流器的协调控制策略,不仅能够高效、可靠地实现有功功率在正、负两极间的动态均衡分配,确保系统功率传输的稳定性,还能同步为风电场接入点提供稳定的电压支撑,将交流电压波动抑制在较低水平,充分保障了风电场并网点电压的稳定性和电能质量,验证了其在应对大规模风电功率波动方面的综合技术优势。

3.2 算例 2:频率控制目标出现数据偏差工况下所提控制策略的有效性验证

为评估实际工程中数据误差对控制策略的影响,本节设计以下仿真算例,验证所提双极换流器协

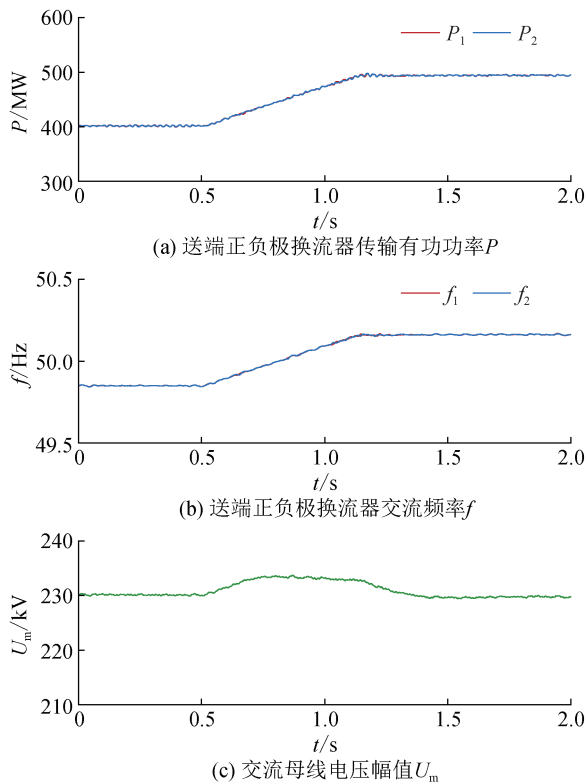


图 16 风电场功率波动时 P - f 上升 / Q - U 下垂控制策略的仿真结果

Fig. 16 Simulation results of P - f rise / Q - U droop control strategy with wind power fluctuation

调控策略在频率初始参考值存在微小偏差时的协调能力。设定正极换流器的频率初始值 f_{01} 为 50.01 Hz, 负极换流器的频率初始值 f_{02} 为 49.99 Hz, 二者存在 0.02 Hz 的初始偏差。频率初始值不同时采用协调控制策略和 VF 控制策略的仿真结果如图 17 和 18 所示。

图 17 和图 18 的仿真结果分析表明, 采用 P - f 上升 / Q - U 下垂控制策略的送端正、负极换流器的初始频率参考值存在微小偏差时, 通过快速调节双极换流器传输的有功功率可调整其交流侧输出频率趋于一致。仿真表明, 系统仅需 0.15 s 即可实现双极交流侧频率的协调一致。在此暂态过程中, 交流母线电压与直流电压虽出现短暂波动, 但其幅值被限制在 $\pm 1\%$ 的极小范围内, 并能在扰动后迅速恢复稳定状态。这种兼具快速频率协调与强电压支撑能力的特性, 显著提升了系统应对初始数据误差的鲁棒性。

采用传统 VF 控制策略的双极换流器在相同工况下暴露出明显缺陷。由于 VF 策略的控制目标具有刚性约束, 即强制维持预设的电压与频率, 因此当双极换流器初始频率参考值存在偏差时, 系统缺乏动态协调机制。仿真结果显示, 正、负极换流器因无法调

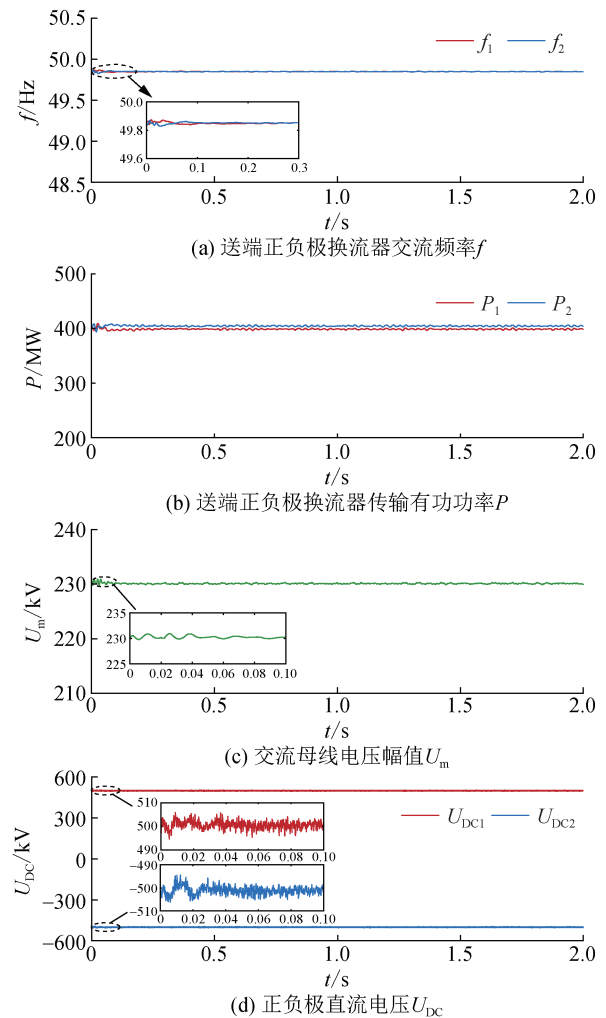


图 17 频率初始值不同时采用协调控制策略的仿真效果
Fig. 17 Simulation results of coordinated control strategy with different initial frequency

节频率, 其交流侧输出频率始终处于失步状态。这种频率不可调和性直接导致系统无法建立统一的同步运行点, 进而引发持续功率振荡, 最终将使电力系统丧失稳定运行条件。

由此表明, 相较于传统 VF 控制, 送端正负极换流器采取 P - f 上升 / Q - U 下垂控制策略在应对频率参考值数据偏差时具有显著优势, 有效避免了数据误差导致的频率失稳问题, 提升了含高比例新能源电网的运行可靠性。

3.3 算例 3: 双极换流器容量不同工况下不同控制策略的有效性验证

为对比分析双极换流器最大传输容量不同时 1.4 节所提 2 种控制策略的有效性, 本节设计以下仿真算例: 设定正极换流器最大传输容量受限, 为额定传输容量的 80%, 即 480 MW, 拐点系数 k_s 为 0.9, 有功功率拐点值为 432 MW; 负极换流器最大传输容量不变, 仍为额定传输容量, 即 600 MW。0~0.5 s 期间,

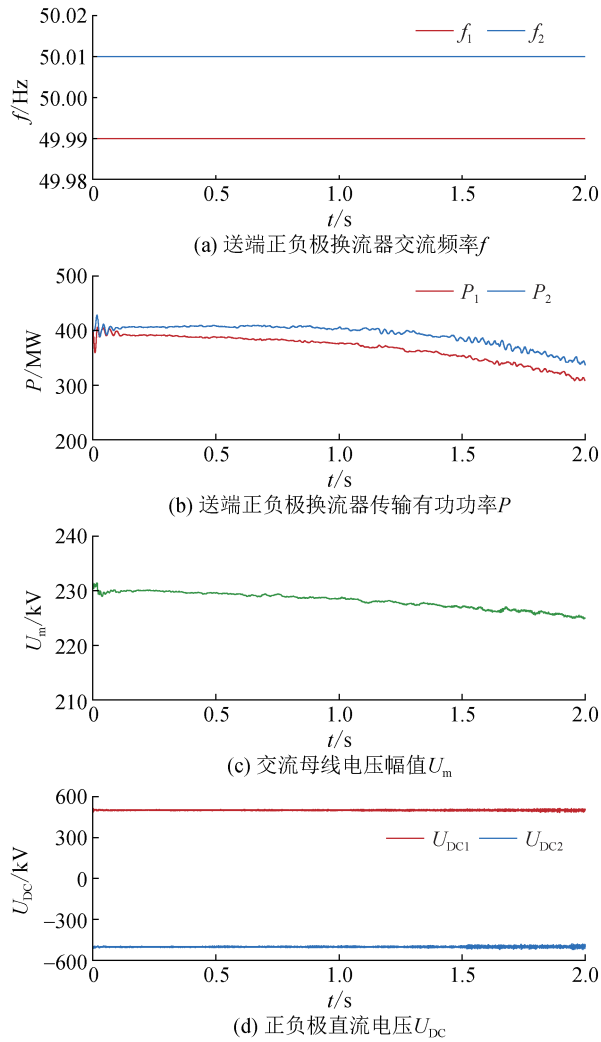


图 18 频率初始值不同时采用 VF 控制策略的仿真效果
Fig. 18 Simulation results of VF control strategy with different initial frequency

风电场输出的有功功率为 800 MW; 0.5 s 时, 风电场输出的有功功率增加至 1000 MW。正极换流器传输容量受限时控制策略不变及控制策略切换的仿真结果如图 19 和 20 所示。

图 19 和图 20 的仿真结果对比分析表明, 某极换流器容量受限工况下保持双极换流器控制策略不变, 仅调整受限极有功功率-频率方程的调节系数即可实现对双极传输功率的合理分配。当正极换流器接收的有功功率为 400 MW, 低于预设拐点值时, 正、负极换流器传输的有功功率相等, 严格维持了正、负极直流网络间的功率平衡。随着风电场出力增加, 正极接收功率达到并超过预设拐点值 432 MW 后, 通过升高正极换流器的有功功率-频率响应方程的调节系数, 有效抑制其有功功率的增长速率, 同时提升负极换流器的功率传输比例, 实现功率的动态自适应分配。在风电场出力达到 1000 MW 的稳态工况下, 正极换流器传输功率基本稳定于 450 MW, 严格限制

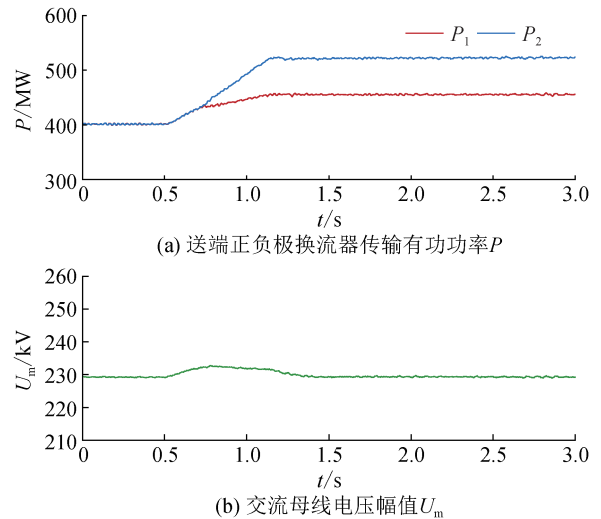


图 19 正极换流器传输容量受限时控制策略不变的仿真结果
Fig. 19 Simulation results of the control strategy unchanged with capacity limitation of positive converter

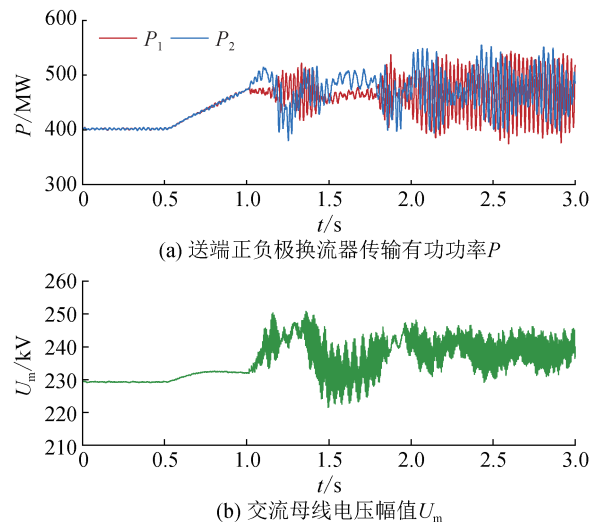


图 20 正极换流器传输容量受限时控制策略切换的仿真结果
Fig. 20 Simulation results of control strategy switching with capacity limitation of positive converter

在其最大传输容量之内, 有效规避了功率越限风险。在整个动态调节过程中, 交流母线电压波动幅值始终被严格限制在 $\pm 3\%$ 范围内。

然而, 若在正极换流器达到最大传输容量后将其由 $P-f$ 上升/ $Q-U$ 下垂控制切换为 PQ 控制, 则会导致双极换流器传输功率及交流母线电压幅值出现显著波动, 系统无法达到稳定运行状态。

上述结果表明, 在不对称容量约束下, 本文所提的仅调整调节系数而保持 $P-f$ 上升/ $Q-U$ 下垂控制策略不变的方法能够在正极换流器传输功率未达设定拐点值时, 同时保障功率均衡与电压稳定; 而在其功率超过拐点值时, 确保换流器功率严格受限并维持系统安全稳定运行, 提升了柔性直流输电工程应对非对称运行条件的可靠性。

3.4 算例 4:送端换流站输出无功功率变化工况下所提控制策略的有效性验证

为验证所提送端双极换流器协调控制策略在送端换流站输出无功功率需求改变时的交流电压稳定性,本节设计以下仿真算例,初始为稳定运行状态,风电场输出的无功功率为 80 Mvar,0.5 s 时,风电场接入一个 10 Mvar 容性无功补偿源,使其输出无功功率增加至 90 Mvar,其仿真结果如图 21 所示。

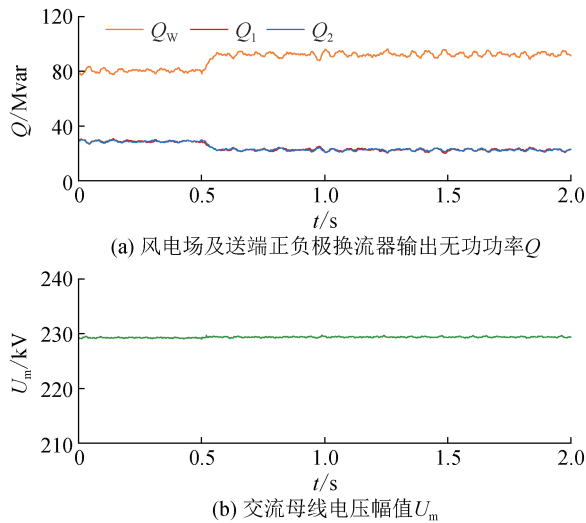


图 21 送端换流站输出无功功率改变时 P - f 上升/ Q - U 下垂控制策略的仿真结果

Fig. 21 Simulation results of P - f rise / Q - U droop control strategy with output reactive power of the sending converter station changes.

由图 21 可知,当风电场输出的无功功率由 80 Mvar 增加至 90 Mvar 时,送端双极换流器输出的无功功率随之减少,这表明,双极的协调控制策略有效捕捉了系统无功平衡状态的改变,并及时调整了换流器的运行点。在整个动态调节过程中,交流母线电压幅值始终维持在极小的波动范围内,展现出良好的电压支撑能力。

仿真结果充分证明,该控制策略具备优异的动态响应能力,能够根据系统实时需求协调控制换流器的无功出力,使其与风电场的变化形成互补,并始终维持交流母线电压的高稳定性,满足电力系统安全稳定运行对电压控制的严格要求。

4 结 论

1) 通过理论推导,研究了送端换流器接收的有功功率-相位-频率的耦合机理,据此建立了送端双极换流器的有功功率-频率上升控制策略,实现了正、负极直流网络的功率均衡和频率协调。进一步通过调整有功功率-频率方程的调节系数,实现特殊工况下

的非对称运行。

2) 通过无功功率与电压的耦合关系建立了受端换流器额定容量和传输有功功率约束的无功功率-电压下垂特性控制策略,实现了双极换流器交流母线电压控制目标的协调。

仿真结果表明本文所提有功功率-频率上升/无功功率-电压下垂控制策略不仅能够有效保障系统在各种运行工况下的功率均衡分配与交流电压稳定,而且对实际工程应用中难以避免的,由设备原因导致的控制参数误差展现出良好的鲁棒性。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

李博通提出研究方向,设计论文框架和研究方案,修订并审阅论文;吝梦媛起草论文、修订论文、审核论文;郑光辉参与插图绘制和论文最终版本修订;董岳金参与论文的审阅和修订;刘轶超参与论文的审阅。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 杨铎炯,俞靖一,葛俊,等. 海上风电场自适应多目标无功优化控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 121-129.
YANG Duotong, YU Jingyi, GE Jun, et al. Adaptive multi-objective reactive power optimization control strategy for offshore wind farms[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 121-129.
- [3] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[N]. 人民日报, 2021-03-13(1).
- [4] 王凯伦,宋强,赵彪,等. 基于虚拟调速控制的大型孤岛新能源基地 LCC 直流送出方案[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 54-65.
WANG Kailun, SONG Qiang, ZHAO Biao, et al. LCC-HVDC transmission scheme for large-scale islanded renewable energy bases based on virtual governor control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 54-65.
- [5] 孟沛彧. 可再生能源基地不同接入方式下直流系统拓扑构建与控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
MENG Peiyu. Research on topology construction and control strategy of HVDC transmission system under different access methods of renewable energy bases [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [6] 张艳,张旭,张静怡,等. 考虑风电不确定性的沙戈荒新能源基

- 地交直流混合外送系统最大传输能力评估[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 174-186.
- ZHANG Yan, ZHANG Xu, ZHANG Jingyi, et al. Evaluation of total transmission capacity of AC-DC hybrid delivery system in desert new energy base considering the uncertainty of wind power [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12): 174-186.
- [7] GUO H L, ZHANG Z R, XU Z. Parallel converter-based hybrid HVDC system for integration and delivery of large-scale renewable energy [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 13(2): 688-697.
- [8] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
- XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [9] RODRIGUEZ P, ROUZBEHI K. Multi-terminal DC grids: challenges and prospects [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(4): 515-523.
- [10] LI Z X, TANG B J, SONG Q, et al. Low-cost and compact asymmetrical unidirectional-current modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3398-3411.
- [11] 饶宏, 黄伟煌, 郭知非, 等. 柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3347-3355.
- RAO Hong, HUANG Weihuang, GUO Zhifei, et al. Practical experience of VSC-HVDC transmission in large grid [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3347-3355.
- [12] 陶思钰, 江福庆. 集群化发展模式下风电场预测、规划及控制关键技术综述[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 86-99.
- TAO Siyu, JIANG Fuqing. Review of the key technologies of wind farm cluster prediction, planning and control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 86-99.
- [13] 凌卫家, 孙维真, 张静, 等. 舟山多端柔性直流输电示范工程典型运行方式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1751-1758.
- LING Weijia, SUN Weizhen, ZHANG Jing, et al. Analysis of typical operating modes of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC pilot project [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1751-1758.
- [14] 王国钰, 范春菊, 李潇. 伪双极接线不同接地方式下直流配电网故障穿越极方案[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3570-3579.
- WANG Guoyu, FAN Chunju, LI Xiao. Fault pole selection of DC distribution lines under pseudo-bipolar wiring with different grounding modes [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3570-3579.
- [15] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173.
- DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173.
- [16] 林少伯, 李新年, 雷霄, 等. 张北柔性直流电网运行方式转换风险分析及预防措施[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4017-4025.
- LIN Shaobo, LI Xinnian, LEI Xiao, et al. Risk analysis and prevention measures of operation mode transformation for Zhangbei VSC-based DC grid [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4017-4025.
- [17] 雷霄, 杨立敏, 朱艺颖, 等. 白鹤滩-江苏特高压混合级联直流工程数模仿真平台构建及特性研究[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 434-443.
- LEI Xiao, YANG Limin, ZHU Yiyang, et al. Digital-analog hybrid simulation platform construction and characteristic research of Baihetan-Jiangsu hybrid cascaded UHVDC project [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 434-443.
- [18] 张宇宇, 周前, 刘建坤. 江苏海上、沿海和内陆风电出力及波动特性分析[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 18-23.
- ZHANG Ningyu, ZHOU Qian, LIU Jiankun. Output and fluctuation characteristics of off-shore, coastal and inland wind farms in Jiangsu province [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 18-23.
- [19] 梁远升, 徐征, 李海锋, 等. 计及新能源出力不确定性的短路特征分析模型与继电保护实时风险评估[J]. 电力建设, 2025, 46(2): 113-124.
- LIANG Yuansheng, XU Zheng, LI Haifeng, et al. Short-circuit characteristic analysis model and real-time risk assessment of protection considering uncertainties of new energy output [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(2): 113-124.
- [20] 李周, 詹若培, 李亚州, 等. 真双极多端柔性直流输电系统多目标协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 101-110.
- LI Zhou, ZHAN Ruopei, LI Yazhou, et al. Multi-objective coordinated control strategy for real bipolar VSC-MTDC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 101-110.
- [21] 刘文胜, 王海云, 黄新民, 等. 真双极 VSC-MTDC 风场侧换流站软切换控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 87-97.
- LIU Wensheng, WANG Haiyun, HUANG Xinmin, et al. Soft switching control strategy of true bipolar VSC-MTDC wind field side converter station [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 87-97.
- [22] 江守其, 李国庆, 辛业春, 等. 风电经架空线双极 MMC-HVDC 并网的直流故障穿越协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3516-3527.
- JIANG Shouqi, LI Guoqing, XIN Yechun, et al. Coordinated control strategies for DC fault ride-through of wind power integration via bipolar MMC-HVDC overhead lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3516-3527.
- [23] 李国庆, 张林, 江守其, 等. 风电经双极混合型 MMC-HVDC 并网的直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 27-36.
- LI Guoqing, ZHANG Lin, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategies for DC fault ride-through of wind power integration via bipolar hybrid MMC-HVDC overhead lines [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 27-36.
- [24] 孙银锋, 刘宇晗, 郭宇航, 等. 基于分散式储能的风电柔直并网

- 直流故障穿越协调控制[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 35-47.
- SUN Yinfeng, LIU Yuhan, GUO Yuhang, et al. DC fault ride through coordinated control of wind power flexible direct grid connection based on decentralized energy storage [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 35-47.
- [25] 孙银锋, 路玉泽, 刘宇晗, 等. 基于储能的风电柔直并网系统直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 122-132.
- SUN Yinfeng, LU Yuze, LIU Yuhan, et al. Coordinated control strategy of DC fault ride-through for flexible DC grid-connected system of wind power based on energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 122-132.
- [26] 王振浩, 李金伦, 王欣铎, 等. 风电接入真双极 MMC-MTDC 系统直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 26-36.
- WANG Zhenhao, LI Jinlun, WANG Xinduo, et al. DC fault ride-through coordinated control strategies for bipolar MMC-MTDC system with wind power connected [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 26-36.
- [27] WANG S S, QIN S M, YANG P B, et al. Research on the new topology and coordinated control strategy of renewable power generation connected MMC-based DC power grid integration system [J]. Symmetry, 2021, 13(10): 1965.
- [28] 梅念, 苑宾, 李探, 等. 接入孤岛新能源电场的双极柔直换流站控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3575-3582.
- MEI Nian, YUAN Bin, LI Tan, et al. Study on control strategy of bipolar VSC station connected to islanded renewable power plant [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3575-3582.
- [29] 胡兆庆, 董云龙, 王佳成, 等. 高压柔性直流电网多端控制系统架构和控制策略[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 461-470.
- HU Zhaoqing, DONG Yunlong, WANG Jiacheng, et al. Flexible DC grid multi-terminal control and protection system framework and control strategy [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 461-470.
- [30] 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Technical specification for connecting wind farm to power system: part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [31] 关晓羽, 汪娟娟, 何启皓. 高压直流稳态工况无功调节能力[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 100-107.
- GUAN Xiaoyu, WANG Juanjuan, HE Qihao. Reactive power adjustable ability of HVDC under steady state condition [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 100-107.
- [32] 雷家兴, 周浩然, 冯双, 等. 新能源发电基地经二极管整流送出系统的受端换流站控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(16): 6461-6473.
- LEI Jiaying, ZHOU Haoran, FENG Shuang, et al. Control strategy of the receiving end converter station of the renewable energy generation base through the diode rectifier transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(16): 6461-6473.
- [33] 张兆洋, 高丙团, 索之闻, 等. 柔性直流输电系统支撑新能源送端频率稳定的自适应双下垂控制策略[J]. 电力建设, 2025, 46(5): 1-11.
- ZHANG Zhaoyang, GAO Bingtuan, SUO Zhiwen, et al. Adaptive dual droop control strategy of VSC-HVDC for supporting frequency stability of sending-end system with renewable energy [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(5): 1-11.

收稿日期: 2025-07-21 修回日期: 2025-08-24



李博通

作者简介:

李博通(1981),男,博士,教授,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制,E-mail:libotong@tju.edu.cn;

齐梦媛(2000),女,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制;

郑光辉(2000),男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制;

董岳金(2001),男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制;

刘轶超(1993),男,博士,中级工程师,主要从事电力系统保护与控制方面的工作。

(编辑 景贺峰)