

一种适用于大规模新能源远距离外送的分层混联输电系统

孟沛彧¹, 向往^{1*}, 迟永宁², 王志冰², 荆江平³, 文劲宇¹

- (1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北省 武汉市 430074;
2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192;
3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省 南京市 210024)

A Hierarchical LCC-MMC Hybrid Transmission System for Transmitting Large-scale Renewable Power Over Long-distance

MENG Peiyu¹, XIANG Wang^{1*}, CHI Yongning², WANG Zhibing², JING Jiangping³, WEN Jinyu¹

- (1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China; 3. State Grid Jiangsu Power Company, Nanjing 210024, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: To achieve the collection and long-distance transmission of large-scale onshore renewable energy sources such as wind power, this paper proposed a hybrid cascaded DC transmission system suitable for the hierarchical access of multiple wind power bases with different scales. Firstly, the topology and operating characteristics of the hierarchical access-hybrid cascade transmission system were introduced. The system was designed with a double-layer structure, which could realize the access of wind farms of different scales. The high-voltage valve adopted the line commutated converter, and modular multilevel converters were connected in parallel as the low-voltage valves. Then, the mathematical model of the system was built, and the coordinated control strategy was designed accordingly. To respond to the wind farm output fluctuations, the adaptive $P-V$ droop control was designed to ensure the stable operation of the system. Finally, a simulation model of the hierarchical access-hybrid cascade transmission system was built in PSCAD/EMTDC to verify the effectiveness of control strategies. The research results show that the system could be an alternative for long-distance transmission of large-scale wind power.

KEY WORDS: hybrid HVDC transmission system; cascaded converter; hierarchical access; renewable energy transmission; adaptive droop control

摘要:为实现内陆大规模风电等新能源的直流汇集与远距离输送,该文提出一种适用于不同规模风电基地分层接入的混合级联输电系统。首先介绍分层接入-混合级联输电系统的拓扑结构与运行特性。该系统为双层结构,高压阀组采用电网换相换流器,多个模块化多电平换流器并联作为低压阀组,可实现不同规模风电基地的分层接入。随后分析系统的数学模型,并在此基础上设计协调控制方案。针对风电基地出力波动,为系统设计阀组电压自适应控制,保障系统的稳定运行。最后在PSCAD/EMTDC中搭建分层接入-混合级联输电系统仿真模型,验证控制策略的有效性。研究表明,该系统可为大规模风电远距离传输提供一种新选择。

关键词:混合型直流输电系统;级联换流阀;分层接入;新能源输送;自适应下垂控制

0 引言

在当前化石能源不断消耗、环境污染日益严峻的背景下,大力发展风电等新能源,实现能源转型,是雾霾治理、环境保护的关键,是中国乃至世界的发展方向^[1-2]。近年来,中国新能源发展迅速,是全球风能和太阳能发电装机容量最大的国家。到2019年底,全国风电累计装机2.1亿kW,占全部发电装机的10.4%,其中陆上风电累计装机2.04亿kW。

基金项目 国家电网公司科技项目(大型新能源基地采用VSC-LCC混合直流外送技术研究)。

Project of State Grid Science and Technology Foundation (Research on power transmission of large-scale renewable power base by VSC-LCC hybrid HVDC).

目前国内外对风力发电的研究主要集中在海上风电输送的相关领域^[3],如换流器的结构^[4]、输电系统的拓扑以及多种输送方式的协调控制等^[5-6],而针对我国陆上风电的能源汇集与输送,特别是孤岛送出场景的研究较少。

新能源基地主要位于我国西部地区以及三北地区,而负荷中心则位于东部和中部地区^[7]。新能源基地用电需求低,自身消纳能力弱,将富余风电送到我国负荷中心进行消纳,是降低弃风率的有效途径,是推动能源结构调整的重要方向,因此采用高压直流输电技术对新能源进行远距离外送是必然选择。目前可应用于联接陆上大型风电基地的换流器主要有电网换相换流器(line commutated converter, LCC)与模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。

基于电网换相换流器的高压直流输电系统(LCC-HVDC)具备容量大、成本低且技术成熟的优点,在大规模能源送出系统中得到了广泛应用^[8]。然而,LCC不具备自换相能力,需要一定强度的交流系统为其提供换相电压,而独立运行的风电场无法满足这一需求,因此LCC换流站难以独立实现风电孤岛外送^[9]。为了解决这一问题,文献[10-11]讨论了在风电场附近配套建设火电机组或者水力发电机组,为风电提供调节电源,将风电与传统能源发电捆绑输送到负荷中心。以哈密—郑州 ± 800 kV特高压直流输电工程为例,其将中国西北地区火电、风电打捆送出^[12]。然而,受限于能源资源以及生态环境方面的约束,并非所有风电基地都有条件就近建设配套电厂。为向LCC提供稳定的换相电压,文献[13-14]考虑LCC与静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)或同步调相机并联构成输电系统。但是该方案大幅提升了系统的投资以及运行维护成本,同时也增加了占地面积,在经济性上不具备优势。

基于模块化多电平换流器的高压直流输电系统(MMC-HVDC)具有可独立控制有功无功、能够为弱交流系统甚至无源系统供电的优点,适合直接联接风电场^[15]。然而,其成本高、容量较小以及无法有效处理直流侧故障的缺点,限制了其在风电大规模送出场景下的应用^[16]。为此,有文献提出了采用MMC-LCC混合型输电系统,实现两种换流器的优势互补。典型拓扑有:整流侧为MMC换流站、逆变侧为LCC的端间混合结构^[17];LCC与MMC串

联作为送端的极间混合结构^[18]。然而混合型直流输电系统的传输功率受限于MMC,难以满足风电大规模远距离输送的需求。

上述方案均为单层直流输电系统,仅能实现单个风电基地的接入,或多个风电基地交流汇集后集中接入,系统灵活性较差。风电集群直流汇集与输送可以提升输电效率与电网灵活性,是未来交直流混联电网形态的重要组成部分^[19]。因此,针对不同地理位置且不同规模的陆上风电基地,设计兼具运行灵活性与经济性的直流汇集与输送系统十分必要。

为了满足以上需求,本文提出一种分层接入—混合级联风电直流输送系统,充分发挥常规直流输电与柔性直流输电的技术优势,在保证输电稳定性的同时满足了风电基地的灵活接入,还兼顾了经济性,为大型新能源基地经高压直流输电系统远距离输送提供了一种新的思路。

本文首先介绍了分层接入—混合级联输电系统的拓扑结构,通过与传统风电汇集和输送方案的对比,分析系统的经济性以及运行特性。随后根据系统的数学模型分析系统功率分配方案,在此基础上设计系统的协调控制策略。针对风电基地出力波动,为系统设计阀组直流电压自适应控制,保障系统的稳定运行。最后,对系统多种工况下的运行情况进行理论分析并在PSCAD/EMTDC仿真平台中搭建输电系统电磁暂态模型,验证系统控制方案的可行性。

1 混合级联输电系统拓扑结构与技术特点

1.1 混合级联输电系统拓扑结构

本文设计的分层接入—混合级联输电系统采用双极接线方式。为清晰展示系统结构与运行特点,本文仅将正极部分进行展示,其拓扑结构如图1所示。

输电系统送端采用双层结构,其中,LCC为高压阀组,MMC1、MMC2并联构成低压阀组,高低压阀组串联组成混合级联换流阀,实现孤岛系统下风电基地的功率送出。MMC换流站可以维持交流并网点电压稳定,LCC处理直流短路故障问题。风电经高压直流输电线路输送,由模块化多电平换流器将能量传递到负荷地区的交流系统。出于经济性考虑,系统中所有MMC换流器均采用半桥型子模块(half bridge submodule, HBSM)。为了尽可能消除交直流谐波对系统的影响,LCC换流站配置了交

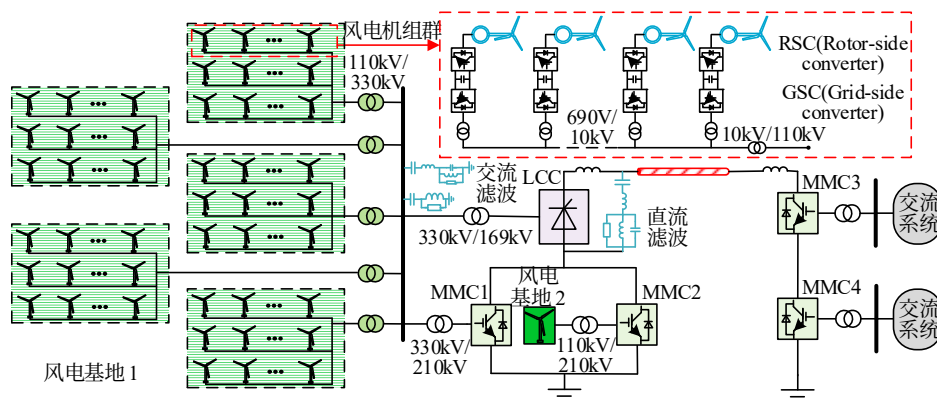


图 1 分层接入-混合级联直流输电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of the hierarchical access-hybrid cascade transmission system

流、直流滤波器。

混合级联输电系统中, 5 个小规模风电场汇集成大容量风电基地 1, 同时接入 LCC 与 MMC1 换流站, 充分利用 LCC 换流站的容量; 规模较小的风电基地 2 单独联接 MMC2 换流站, 实现了不同规模风电基地的分层接入, 避免了小规模风电基地多次升压汇集后才能接入高压直流电网, 减少变压器投资。

目前主流风力发电机组的单机容量在 1.5~3MW, 典型的交流电压等级为 690V, 一般采用交流集中接入的方式: 电站内部各风电机组首先经过单元变压器升至 10/35kV; 多个电站再经过交流集电线路汇集到升压站升压至 110~330kV; 若风电基地规模较大, 还需进一步升压至 500~750kV, 接入主网。

针对本文提出的混合级联输电系统拓扑结构, 同时考虑西北地区电压等级, 各风电机组内部的单元变压器电压比选取为 690V/10kV, 多个风电机组汇集形成的风电机组群配备电压比为 10/110kV 的升压变压器。对于大容量风电基地 1, 5 个小规模风电场首先在汇集升压站将交流电压提升至 330kV, 再接入换流站进行直流输送。

1.2 风电汇集方案对比

如 1.1 节所述, 我国西北地区的风力发电一般采用集中接入的方式, 即通过 110/330/750kV 逐级交流汇集, 再经 750kV 通道输送至西北电网, 在当地消纳或通过高压直流远距离输送到华北、华中和华东电网消纳, 如图 2 所示。

随着新能源大力开发, 偏远风电基地的规模进一步增大, 继续采用传统的风力汇集模式不利于风电的高效利用。建设风电集群的直流汇集与输送系统符合我国发展现状, 本文提出的分层接入-混合

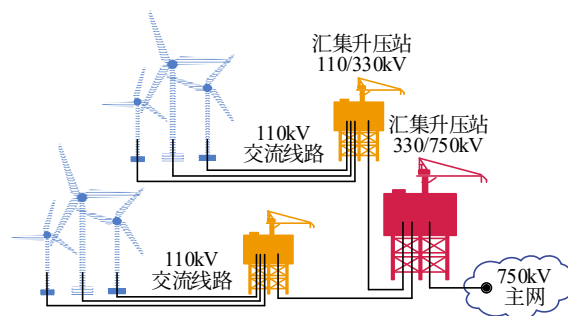


图 2 风电场群交流汇集方案

Fig. 2 Scheme of wind farm's alternating collection

级联输电系统即是风电场直流汇集与输送的方案之一。

直流汇集需要风电场先进行 AC/DC 变换再接入直流汇集网, 主要有两种方案:

1) 多个风电场集中配置 AC/DC 换流站。此种方案需要换流站额定运行时的最大容量大于多个汇集风电场的装机容量之和, 对换流站容量以及运行可靠性要求较高。其优点为多个风电场汇集后具有功率平滑效应, 输出功率较为稳定, 且有利于 AC/DC 换流站控制交流母线的电压。混合级联系统中由 5 个小规模风电场组成的大型风电基地 1 即采用此种汇集方案。LCC 换流站的容量优势能够满足此种方式的需求。

2) 每个风电场就地配置各自的 AC/DC 换流站。该种汇集方式可以选择在升压站高压侧接换流器, 或者直接用换流站替换升压变压器。前一种方案适用于输送容量大或输送距离远的风电场; 后一种方案可以减少升压变压器的使用, 经济性更优。考虑到混合级联系统的目标是尽量避免小规模风电场的多次升压汇集, 风电基地 2 采用后一种接入方式。

通过对图 1 与图 2 所示两种风电汇集方案的分析, 相比于传统的交流汇集方案, 因无需连接

750kV 主网,混合级联输电系统减少了 330/750kV 这一汇集环节;此外,风电基地 2 直接用换流站换流变压器替换升压变压器,减少了 110/330kV 这一升压环节。

从经济性的角度分析,设风电基地 1、2 的功率分别为 P_{w1} 、 P_{w2} ,按照 110/330/750kV 这 3 个汇集等级,交流汇集接入方式下的变压器换流总容量 $P_{\Sigma 1}$ 为

$$P_{\Sigma 1}=3(P_{w1}+P_{w2})$$

(1)

混合级联输电系统所需的变压器换流总容量 $P_{\Sigma 2}$ 为

$$P_{\Sigma 2}=2P_{w1}+P_{w2}$$

(2)

若风电基地 1、2 的功率分别为 3500、1500MW,交流汇集接入方式下升压站的总容量应为 15GW,而混合级联输电系统的汇集升压站总容量为 8.5GW,仅为传统方案的 56.7%。

基于上述分析,对于本文考虑的孤岛系统而言,风电场采用直流汇集与输送的方式可以在较大程度上降低风电的汇集成本,减少了系统使用变压器的换流总容量,具有良好的经济性。

1.3 混合级联输电系统与常规输电方案性能比较

目前已有的直流输电方案主要有 LCC-HVDC、MMC-HVDC、LCC-HVDC 整流侧并联 STATCOM 以及 LCC-HVDC 整流侧并联同步调相机。由于本文解决新能源接入问题,下面对已有直流输电系统与混合级联输电系统的整流侧换流器进行对比。

整流运行时,MMC 的损耗约为其额定功率的 0.66%,LCC 的损耗率为 0.35%,STATCOM 的损耗率约为 0.66%,调相机的损耗率约为 1.15%^[18,20]。在混合级联输电系统中,若高低压阀组电压相同,则 MMC 换流站的容量占输电系统的 1/2,输电系统送端的运行损耗约为其额定功率的 $1/2 \times 0.66\% + 1/2 \times 0.35\% = 0.505\%$,相比柔性直流输电系统有明显降低;同时混合级联输电系统又兼具 MMC 可自换相的优点,可直接联接于风电场。

在混合级联输电方案中,整流侧 MMC 换流站总容量与 LCC 换流站容量比例取 1:1,而在 LCC 并联 STATCOM 及 LCC 并联调相机的方案中,无功支撑装置与 LCC 换流站的容量比例取 1:4。根据乌东德工程以及张北工程的换流设备造价,若要实现 5GW 的功率输送,半桥型 MMC 的成本约为 LCC 的 444%,而与 LCC 换流站容量配套的 STATCOM

和同步调相机成本分别为 LCC 换流站成本的 281% 和 208%^[21-23]。据此可计算各输电方案整流侧的换流站及其支撑设备造价,列于表 1 中。

表 1 混合级联输电系统与其他换流器性能比较

Table 1 Performance comparison of hybrid cascade transmission system with other converters

方案	大规模		直流故障 清除能力	运行损 耗率/%	换流站 成本/%
	新能源	多种模式切换			
	独立输送				
LCC-HVDC	不能	若为单层直流	有	0.350	100
LCC 并联 STATCOM	能	输电系统, 则	有	0.515	381
LCC 并联调相机	能	不能实现多种	有	0.638	308
MMC-HVDC	能	模式切换	无	0.660	444
混合级联输电系统	能	能	有	0.505	295

此外,通过换流器的协调控制以及旁路断路器等设备的动作,混合级联输电系统可以实现子换流器的在线投退,完成多种工作模式切换,提升了输电系统的运行灵活性。而现有的输电系统多为单层集中馈入结构,一旦出现换流器检修或风电集电系统故障等情况,整个系统的运行将会受到影响。

总之,混合级联输电系统主要具有 5 个方面的优势:1) 可以独立实现大规模远距离新能源外送;2) 可以降低系统建造成本,具有一定的经济性;3) 具有多种运行模式,提升输电灵活性;4) 具有直流故障清除能力;5) 运行损耗较低。

2 混合级联系统运行原理与控制方案设计

2.1 混合级联输电系统潮流分析

混合级联整流器的简化结构如图 3 所示。LCC 采用 12 脉动换流器,设其换流变压器阀侧空载线电压有效值为 U_L 、直流电压为 U_{dch} 、直流电流为 I_{dc} 、有功功率为 P_{LCC} 、换流器吸收的无功功率为 Q_{LCC} 、每相换相电抗为 X_n 、功率因数为 $\cos\varphi$ 、触发延迟角为 α 、换相重叠角为 μ ,则其数学模型如下所示:

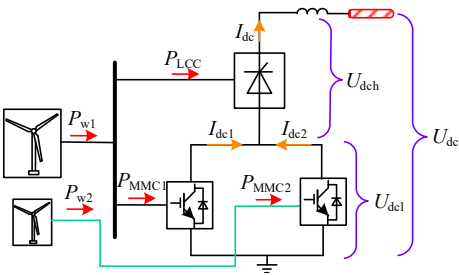


图 3 系统拓扑与电气量

Fig. 3 Topology and electrical quantity of the system

$$U_{dch} = 2.7U_L \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_r I_{dc} \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (4)$$

$$P_{LCC} = U_{dch} I_{dc} \quad (5)$$

$$Q_{LCC} = P_{LCC} \tan \varphi \quad (6)$$

低压阀组的直流电压为 U_{dcl} ，两个 MMC 的有功功率与直流电流分别为 P_{MMCi} 、 $I_{dci}(i=1,2)$ 。

级联输电系统高低压阀组间的电压电流关系可表示为

$$\begin{cases} U_{dch} + U_{dcl} = U_{dc} \\ I_{dcl} + I_{dc2} = I_{dc} \end{cases} \quad (7)$$

各个换流站的有功功率与风电基地出力之间的关系如式(8)所示，其中风电基地的有功功率为 $P_{wi}(i=1,2)$ 。

$$\begin{cases} P_{LCC} = U_{dch} I_{dc} \\ P_{MMC1} = U_{dcl} I_{dcl} \\ P_{MMC2} = P_{w2} = U_{dcl} I_{dc2} \\ P_{LCC} + P_{MMC1} = P_{w1} \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)可以计算得出 LCC 与 MMC1 换流站有功功率的表达式：

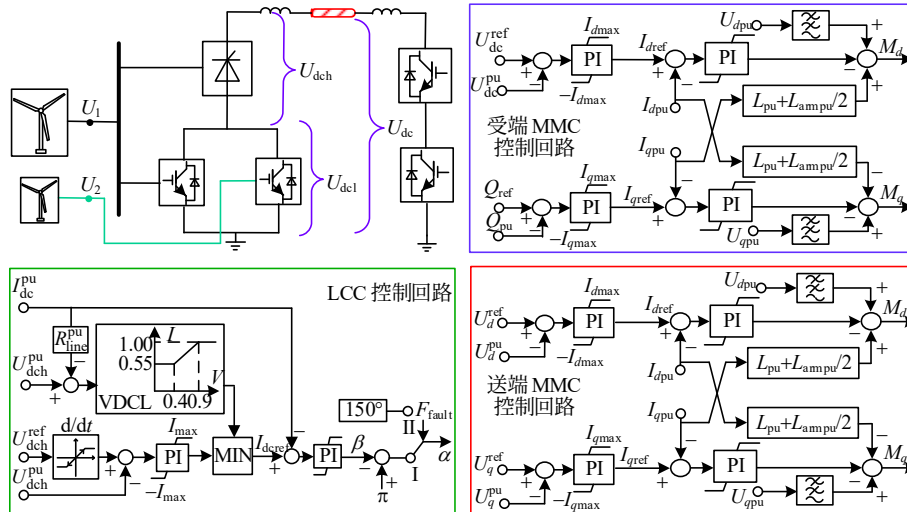


图 4 分层接入-混合级联直流输电系统控制方案

Fig. 4 Control strategy of the hierarchical access-hybrid cascade transmission system

3 风电功率波动下的自适应功率-电压下垂控制

3.1 功率波动对系统运行的影响

随着风速的上升，风电基地送出的有功功率提升，各换流站的输出功率均有所增加。一方面，MMC 承担功率的上升将导致系统损耗增加；另一方面，由于功率上升而引起的电流增加会导致桥臂

$$P_{LCC} = \frac{U_{dch}}{U_{dc}} (P_{w1} + P_{w2}) \quad (9)$$

$$P_{MMC1} = \frac{U_{dcl}}{U_{dc}} (P_{w1} + P_{w2}) - P_{w2} \quad (10)$$

2.2 混合级联系统协调控制策略

为维持系统电压电流稳定，独立控制各个换流站的功率，保证系统稳定运行，结合分层接入-混合级联直流输电系统的数学模型与功率分配分析，设计如下控制方案。

风电机组单元经过 2 个 VSC 实现 AC-DC-AC 变换，从而接入交流汇集线路。其中，电网侧换流器(grid-side converter, GSC)控制 2 个 VSC 间直流电容器的电压，转子侧换流器(rotor-side converter, RSC)控制风机单元发出的有功功率。

逆变侧换流站 MMC3 与 MMC4 均采用定直流电压控制，维持系统直流电压的稳定。级联换流阀内，LCC 控制高压阀组出口处的直流电压；为了实现风电基地的平稳接入，与风电基地相连的 MMC1 和 MMC2 换流站均采用定交流电压控制，建立风电基地的交流电压，同时为 LCC 提供稳定的换相电压。具体的控制回路如图 4 所示。

电流过流，损坏可控整流器件。

在风速下降时，LCC 换流站的有功功率下降，由于 LCC 工作在定电压控制模式，由式(6)可知，LCC 换流站所需的无功功率减少。为了防止交流侧无功功率过剩而引起交流汇集网络电压升高，需要调整 LCC 换流站的触发角，从而增大其吸收的无功功率^[24]。此外，根据式(10)，风电基地 1 的功率

下降可能导致 MMC1 换流站从交流母线吸收的有功功率降为零,甚至出现功率反向流动的情况,扰乱系统正常的功率传输。

3.2 阀组直流电压自适应控制

为了减少风电基地功率波动对系统的影响,混合级联输电系统的协调控制策略需要进一步优化,从而满足多种工况下系统的稳定运行。本节提出一种通过调节高低压阀组直流电压完成换流站间功率再分配的阀组电压自适应下垂控制,其设计思路如下。

结合式(10), MMC1 换流站的直流电流可以表示为

$$I_{\text{dcl}} = \frac{P_{\text{MMC1}}}{U_{\text{dcl}}} = \frac{P_{\text{w1}} + P_{\text{w2}}}{U_{\text{dc}}} - \frac{P_{\text{w2}}}{U_{\text{dcl}}} \quad (11)$$

由式(10)、(11)可知,在系统直流电压以及各个风电基地有功出力不变的情况下,MMC1 换流站的有功功率和直流电流均与低压阀组直流电压 U_{dcl} 正相关。因此,可通过改变低压阀组的直流电压实现 LCC 换流站与 MMC1 换流站间的功率调整。例如,风电基地 1 功率上升时,若降低低压阀组的电压,则增加的功率主要由 LCC 换流站承担,MMC1 换流站的有功功率与直流电流相较于仅采用基本控制策略时均有所减小,可有效解决传输损耗增大与换流站桥臂过流的问题。而在风电基地 1 出力下降时,若降低高压阀组的直流电压,由式(3)可知, LCC 换流站的触发角 α 增大,换流站吸收更多的无功功率,可有效避免 LCC 换流站无功过剩。

由于定交流电压控制的 MMC 换流站不具备直流电压控制能力,直流电压自适应控制由高压阀组 LCC 换流站实现,控制特性曲线如图 5 所示。

图中, P_n 、 U_n 分别为 LCC 换流站的额定功率与额定直流电压; U_{max} 、 U_{min} 为电压限幅值,即 LCC

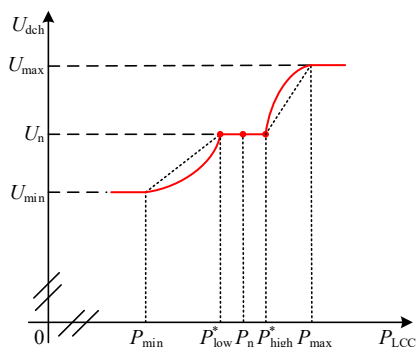


图5 直流电压自适应控制特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of DC voltage adaptive control

换流站稳定状态下直流电压可以达到的最大值与最小值; P_{max} 、 P_{min} 为电压控制可调范围内 LCC 换流站的最大功率与最小功率; P_{high}^* 、 P_{low}^* 分别为控制启动的上限幅值与下限幅值。

图 5 中虚线所示为常规的 P - V 控制特性曲线,其斜率 k 可以表示为

$$k = \begin{cases} \frac{U_{\text{max}} - U_n}{P_{\text{max}} - P_{\text{high}}^*}, & P_{\text{high}}^* < P_{\text{LCC}} \leq P_{\text{max}} \\ 0, & P_{\text{low}}^* \leq P_{\text{LCC}} \leq P_{\text{high}}^* \\ \frac{U_n - U_{\text{min}}}{P_{\text{low}}^* - P_{\text{min}}}, & P_{\text{min}} \leq P_{\text{LCC}} < P_{\text{low}}^* \end{cases} \quad (12)$$

P - V 控制的斜率决定了分配至各换流器的功率波动量,由式(9)可知,风电基地出力波动相同的情况下, LCC 换流站直流电压的变化量越大,其承担的功率波动越多。即 P - V 控制斜率越大,换流器承担越多的功率波动量。

以混合级联输电系统中风电基地 1 出力上升为例,已知 MMC1 换流站的额定功率接近其最大运行功率而 LCC 换流站功率裕度较大。功率上升初期,为了防止 MMC1 换流站桥臂过流, LCC 换流站应承担更多的功率上升量, P - V 控制的斜率应适当增大。在整个可调范围内,为了保证 MMC1 换流站具有足够的功率裕度,在风电基地出力上升量相等的情况下,高压阀组电压应高于定斜率控制时的电压值。

依据以上调节需求,提出一种斜率可变的自适应 P - V 控制,其控制特性如图 5 中红色曲线所示,优化后的 k^* 定义为 P - V 曲线上运行点与 (P_{high}^*, U_n) 或 (P_{low}^*, U_n) 连线的斜率,可以表示为

$$k^* = \begin{cases} \frac{k(P_{\text{max}} - P_n)}{P_{\text{LCC}} - P_n}, & P_{\text{high}}^* < P_{\text{LCC}} \leq P_{\text{max}} \\ 0, & P_{\text{low}}^* \leq P_{\text{LCC}} \leq P_{\text{high}}^* \\ \frac{k(P_{\text{min}} - P_n)}{P_{\text{LCC}} - P_n}, & P_{\text{min}} \leq P_{\text{LCC}} < P_{\text{low}}^* \end{cases} \quad (13)$$

式中 k 为由式(12)确定的初始斜率。为了实现上述控制策略,设计如图 6 所示的 P - V 自适应下垂控制回路。

该控制环应附加于 LCC 换流站的控制回路中,由 1 个“上限幅环”、1 个“下限幅环”以及 1 个附加控制环组成,其输出 U_{dcref} 为高压阀组直流电压的指令值。控制回路中 P_{LCC} 为 LCC 换流站传输的有功功率, U_{dcref}^* 为额定工况下高压阀组直流电压的

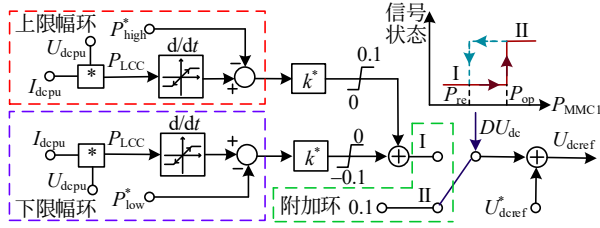


图 6 自适应 P-V 下垂控制回路

Fig. 6 Adaptive P-V droop control loop

指令值, k^* 为根据式(13)计算得出的 P - V 斜率系数。迟滞比较器中 P_{MMC1} 为 MMC1 换流站传输的有功功率, P_{op} 与 P_{re} 分别为迟滞比较器的动作功率和返回功率。为避免 MMC1 换流站过流, P_{op} 设置为其最大额定功率; 为防止电压指令值频繁跳动, P_{re} 应小于附加环节投入后 MMC1 换流站的最小有功功率。控制环中各电气量均为标么值。

控制环节的原理如下: 正常运行时, LCC 换流站传输的有功功率 P_{LCC} 介于 P_{high}^* 和 P_{low}^* 之间。由于 $P_{LCC} < P_{high}^*$, “上限幅环”的输出始终为 0; 同理, 由于 $P_{LCC} > P_{low}^*$, “下限幅环”的输出也始终为 0。即正常工作时, 2 个限幅环节不起作用。

当风电基地 1 功率上升时, LCC 换流站传输的有功功率同样上升, 当 P_{LCC} 超过 P_{high}^* 时, 上限幅环节将输出 1 个正值叠加在 U_{dcref} 上, 从而增大高压阀组直流电压的指令值, 达到降低低压阀组直流电压的目的。风电基地 1 功率高于额定值时, 由于 P_{LCC} 始终高于 P_{low}^* , 下限幅控制环不起作用。

同理, 风电基地 1 功率下降时, LCC 换流站传输的有功功率下降, 当 P_{LCC} 低于 P_{low}^* 时, 下限幅环节输出一个负值叠加在 U_{dcref} 上, 达到增加低压阀组直流电压的目的, 此时上限幅环节不起作用。

若风电基地 2 的出力大幅下降, 则会导致 $P_{MMC1} > P_{op}$, 此时附加环节投入, 提升高压阀组直流电压的指令值, 高压阀组承担更多的有功功率, 使 MMC1 换流站的有功功率在安全范围内。而当 MMC1 功率下降至小于返回功率后, ΔU_{dc} 恢复 I 输出值。

3.3 自适应下垂控制相关参数设计

3.3.1 控制启动上、下限幅值的设置

以酒泉风电基地为例, 风电场群出力变化率在每分钟 0%~0.6% 之内的概率约为 90%, 在每分钟 0%~1.5% 之内的概率约为 99%。文献[25]指出, 对于一般的风电基地, 95% 的置信水平下前后 2 个 10min 平均功率的差值在装机容量的 3% 以内。为了

防止阀组电压自适应控制频繁动作, 同时考虑到系统对于功率波动的承受能力, 控制启动的上限幅值 P_{high}^* 设为 1.03, 下限幅值 P_{low}^* 设为 0.97。

3.3.2 MMC 换流站调制比的设置

混合级联输电系统中整流侧 MMC 换流站的调制比 m 定义为

$$m = \frac{2\sqrt{2}U_{Lrms}}{\sqrt{3}U_{dcl}} \quad (14)$$

式中: U_{Lrms} 为 MMC 换流站交流侧线电压的有效值; U_{dcl} 为低压阀组直流电压。系统实际运行中, MMC 换流站调制比 m 的取值范围为 0.85~0.95^[26]。

为了在较大范围内实现换流站间的功率调整, 整流侧低压阀组直流电压的调整区间设为 0.9~1.1pu。若额定运行状态下送端 MMC 换流站的调制比 m 为 0.9, 当低压阀组直流电压降为 0.9pu 时, 由式(14)可知, 在维持交流电压稳定不变的前提下, 调制比 m 升高至 1, 不满足裕量要求。因此, 对于混合级联输电系统, 正常运行时送端 MMC 换流站的调制比设计为 0.85。在低压阀组电压降为 0.9pu 时, m 升为 0.94, 满足稳定运行的裕度需求。

额定状态下, 混合级联输电系统低压阀组直流电压为 400kV, 交流侧电压为 210kV, 此时调制比为 0.85, 满足自适应控制环节的要求。

4 系统运行特性分析

4.1 额定工况

图 4、6 的控制效果将通过图 7—9 的混合级联输电系统伏安特性加以说明。因受端结构较为清晰, 且控制方式常规, 伏安特性分析以送端为主。

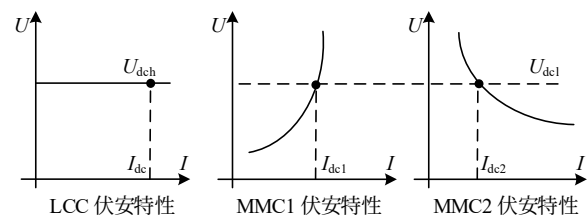


图 7 额定工况时的伏安特性

Fig. 7 V-A characteristics at rated operating conditions

图 7—9 分别为额定工况、风力发电增大以及风力发电减小时系统的伏安特性。其中, “●”代表额定运行点, “▲”是指自适应下垂控制闭锁时风电基地功率波动工况下的运行点, “◆”代表电压自适应控制启用时风电基地功率波动情况下的运行点。

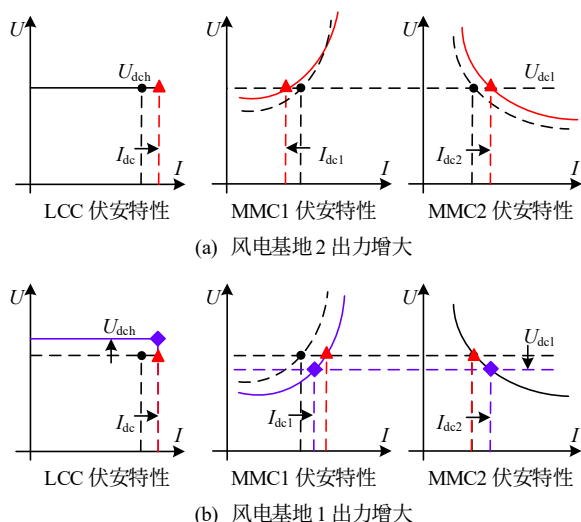


图8 风电出力大于额定值时的伏安特性

Fig. 8 V-A characteristics when wind power is greater than rated value

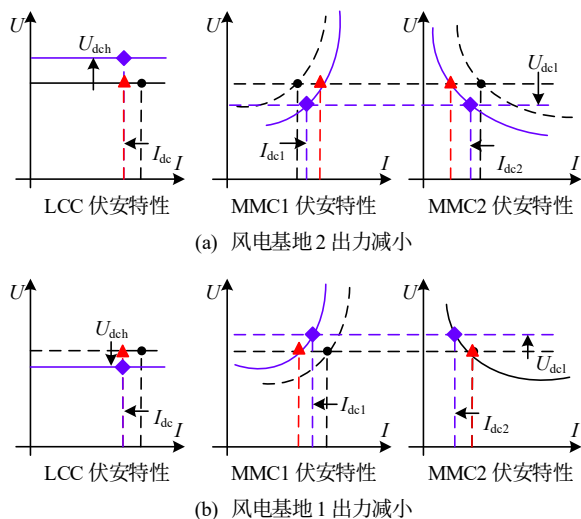


图9 风电出力小于额定值时的伏安特性

Fig. 9 V-A characteristics when wind power is less than rated value

如图7所示,额定工况下,LCC换流站工作在定直流电压工作模式下,MMC2换流站输出的有功功率恒定,MMC1的电压电流关系则由式(11)给出。

4.2 风电出力大于额定工况

风电基地2出力小幅增大,但不足以触发电压自适应控制时,整流侧伏安特性如图8(a)所示。MMC2换流站的直流电流上升导致流经LCC换流站的电流增加,其承担的有功功率相应上升,因此MMC1换流站承担的有功功率下降,直流电流同样减小。

风电基地1出力增大,且自适应下垂控制投入时,整流侧伏安特性如图8(b)所示。风电基地1功率上升时,MMC1的伏安特性曲线右移;自适应下

垂控制启动,高压阀组电压升高,LCC的伏安特性曲线上移,如实线所示。最终,送端各个换流站的直流电流均有所增加。若闭锁自适应下垂控制,MMC1换流站直流电流的上升幅度加大,且换流站承担的有功功率上升明显,导致交流电流大幅增加,更容易造成换流站桥臂过流,此时的运行点如图8(b)虚线所示。

4.3 风电出力小于额定工况

风电基地2出力大幅减小,且自适应下垂控制投入时,整流侧直流运行点移动如图9(a)所示。 I_{dc} 与 I_{dc2} 均下降,LCC换流站输送的有功功率下降,因此MMC1换流站的有功功率与直流电流均增加。当 $P_{MMC1} > P_{op}$ 时,附加控制环节投入,高压阀组电压升高,LCC换流站伏安曲线上移,如实线所示。若闭锁自适应下垂控制,MMC1换流站直流电流的上升幅度加大,且换流站承担的有功功率上升明显,造成换流站桥臂过流,此时的运行点如图9(a)虚线所示。

风电基地1出力减小时,整流侧直流运行点如图9(b)所示。随着风电基地1出力的下降,MMC1的伏安特性曲线左移;LCC换流站功率小于下限幅值时,在电压控制环的作用下,高压阀组电压下降,LCC换流站伏安曲线下移,如实线所示。最终,各个换流站的直流电流均有所减小。若闭锁电压自适应控制,LCC换流站电流下降程度不变,MMC1换流站的电流进一步下降,如虚线所示。

结合以上3种常见工况分析,混合级联输电系统在风电出力增大与减小的情况下均存在稳定的运行点。

5 分层混联输电系统故障穿越能力分析

5.1 直流故障穿越

由全桥型子模块与半桥型子模块组成的混合型MMC可以实现直流故障电流阻断、无闭锁故障穿越以及降压运行等,文献[27]对其拓扑结构与控制策略进行了详细介绍。为提升输电系统的运行可靠性,使系统具有直流故障穿越能力,分层接入—混合级联输电系统的逆变侧有4种扩展技术,如图10所示。

其中,图10(a)为半桥型MMC与晶闸管串联;图10(b)为用一个LCC换流站替换原输电系统逆变侧高压阀组的半桥型MMC换流站;图10(c)为LCC与混合型MMC串联构成逆变侧;图10(d)为逆变侧

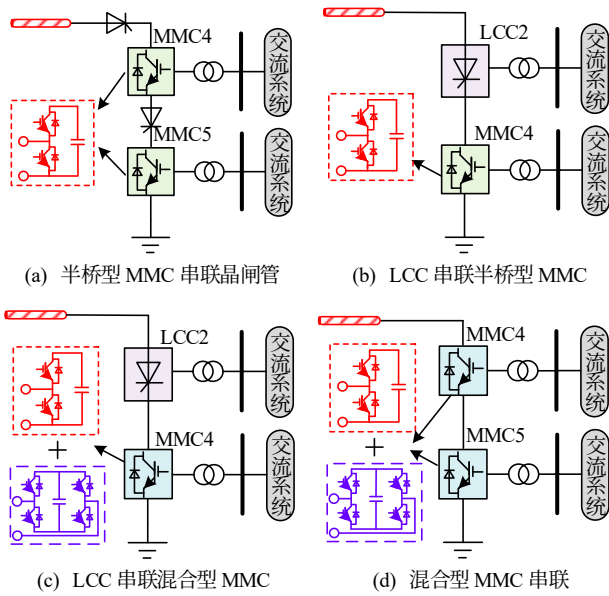


图 10 逆变器拓展拓扑

Fig. 10 Extension topology of inverter side

高低压阀组均为混合型 MMC。

直流故障发生时，对于分层混联直流输电系统，其整流侧 LCC 可以通过强制移相使高压阀组输出负压，抑制短路电流的上升，同时阻断 MMC 换流站的放电通路。而对于逆变侧，图 10(a)可以利用晶闸管的单向导通特性阻断故障电流；由于 LCC 的单向导通特性，图 10(b)、(c)无法向逆变侧提供短路电流；图 10(c)、(d)同样可以采用混合型 MMC 的直流故障电流限流控制实现无闭锁故障穿越^[27]。

由上述分析可知，分层混联直流输电系统具有直流故障电流清除能力，若进一步将系统中半桥型 MMC 换流站替换为混合型 MMC，系统将具备无闭锁直流故障穿越能力。

5.2 交流故障穿越

5.2.1 送端风机侧交流故障

送端风机侧发生交流故障后，风电机组将出现过电流与过电压现象，同时，送端换流站向故障点倒送功率，造成直流电压的下降。由于 MMC1、MMC2 换流站采用定交流电压控制，风电基地交流电网电压跌落，柔直换流站能够提供一定的无功支撑，但受柔直换流站容量的限制，电压跌落程度较深时，柔直换流站提供的无功并不足以使交流电压恢复到正常值，风电机组仍然需要采用低电压穿越装置及配套策略。

目前常用的故障穿越方案为在风电机组内部增加过压保护(Crowbar)电路，并通过与风电机组电网侧换流器的配合，保持直流侧功率平衡，使风电

系统可以继续安全地并网运行^[28-29]。同时，通过风机与 MMC 的控制策略切换，可支撑故障期间并网点电压，实现故障清除后交流电压和功率的快速恢复，且不引起过电压等问题，完成风电场孤岛送出时交流故障的联合穿越^[30]。而当交流故障持续时间较长时，桨距角控制能够有效保护风力发电系统安全^[31]。

5.2.2 受端电网侧交流故障

当受端电网侧发生交流故障后，受端换流站向交流系统输送的功率减少，风电基地出力不能及时响应，系统中出现的不平衡功率对受端 MMC 换流站子模块电容充电，使得系统直流电压迅速上升，影响系统安全稳定运行。

文献[32-33]提出受端电网交流故障穿越方案：在检测到受端电网交流故障后投入耗散电阻，实现故障后瞬间的能量耗散，同时启动风电场降功率控制，应对永久性交流故障。采用上述方案可以实现受端电网交流故障下系统的无闭锁运行，有效避免风机脱网。

由于交流故障穿越策略在上述文献得到了大量研究，在本文中不再赘述。

6 仿真实验

6.1 算例介绍

为验证本文提出的分层接入-混合级联输电系统拓扑结构和协调控制策略的正确性，在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的仿真算例。测试系统的参数如表 2 所示，LCC 采用 PSCAD/EMTDC 中提供的标准模型，MMC 根据文献[18]建立模型。

结合输电系统参数以及现有 IGBT 技术水平，计算稳态运行时 MMC 换流器可以达到的最大功率。以 MMC1 换流站 A 相为例，记相电流的有效

表 2 混合级联输电系统算例参数

Table 2 The parameters of the hybrid cascade transmission system transmission system

参数	LCC	MMC1	MMC2	MMC3/4
额定容量/MVA	2500	1000	1500	2500
额定直流电压/kV	400	400	400	400
直流电抗器/mH	300	200	200	200
桥臂电抗器/mH	—	5	7	10
额定交流电压/kV	330	330	110	525
换流变压器变比	330/169	330/210	110/210	525/220
半桥子模块数量	—	200	200	200
子模块电容/ μF	—	15000	20000	32000

值为 I_{rms} , 流经每相上、下桥臂的电流有效值为

$$\begin{cases} i_{\text{pa}} = \frac{I_{\text{dcl}}}{3} + \frac{i_{\text{rms}}}{2} \\ i_{\text{na}} = \frac{I_{\text{dcl}}}{3} - \frac{i_{\text{rms}}}{2} \end{cases} \quad (15)$$

设 MMC 换流站传输的功率为 P , 功率因数为 1, 换流站交流侧线电压的有效值为 U_{Lrms} , 直流电压为 U_{dcl} , 结合式(15), 上桥臂电流的有效值可以进一步写为

$$i_{\text{pa}} = \frac{P}{3U_{\text{dcl}}} + \frac{P}{2\sqrt{3}U_{\text{Lrms}}} \quad (16)$$

在额定运行状态下, 流经 IGBT 的最大瞬时电流等于桥臂电流的最大值, 即:

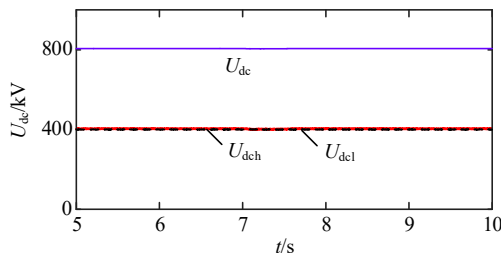
$$i_{\text{max}} = \frac{P}{3U_{\text{dcl}}} + \frac{P}{2\sqrt{3}U_{\text{Lrms}}} \times \sqrt{2} \quad (17)$$

为了满足此直流电压等级的需求, 同时尽量减少 IGBT 的数量从而降低系统的复杂程度以及损耗, 还需兼顾风电的大规模传输, 系统应采用高压大电流的 IGBT, ABB 的 5SMA3000L450300(4.5kV/3kA)满足要求。

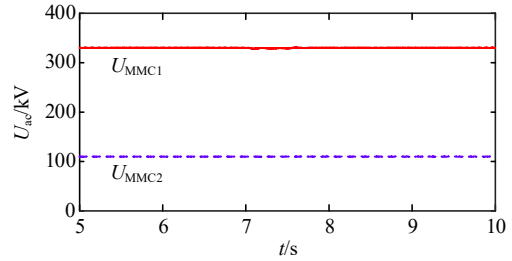
若采用 4.5kV/3kA 的 IGBT 作为混合级联输电系统中 MMC 换流站的开关器件, 在不损坏可控开关器件的前提下, 根据式(17), MMC 换流站所能达到的最大额定功率为 1080MW。由此计算结果可知, MMC1 换流站满足容量要求; MMC2、MMC3 以及 MMC4 的容量问题在实际工程中可以通过多个换流器并联组成 MMC 换流器阀组(banks of MMCs, MMCB)解决^[34], 本文的电磁暂态模型仍采用单一 MMC 换流器代表 MMCB。

6.2 混合级联系统协调控制仿真

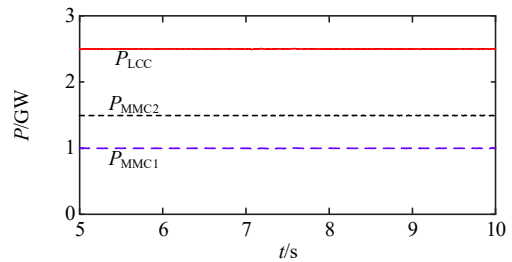
图 11 给出了混合级联输电系统在基本协调控制下的稳态运行情况。图 11(a)~(c)分别为系统高、低压阀组直流电压, 换流站交流电压以及各换流站有功功率。由图 11 可知, 各个换流站的交流电压维持在稳定值, 证明混合级联输电系统中 MMC 换



(a) 系统直流电压



(b) 换流站交流电压



(c) 换流站有功功率

图 11 协调控制仿真验证

Fig. 11 Simulations of the control strategy

流站可以有效建立风电基地的交流电压, 同时为 LCC 换流站提供换相电压。

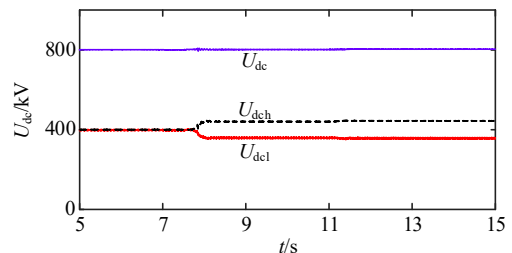
6.3 功率波动仿真

根据 5.1 节的系统参数, 可知阀组电压自适应下垂控制下高低压阀组直流电压可以达到的最大值与最小值分别为 440 和 360kV。结合式(9)、(10)以及风电基地出力的波动概率, 本文将电压自适应控制可调范围内 LCC 换流站的最大功率与最小功率 P_{max} 、 P_{min} 分别设置为 3135MW(1.254pu)、1800MW(0.72pu), 附加环节中 MMC1 换流站的启动功率 P_{op} 与返回功率 P_{re} 分别设置为 1080MW(1.08pu)与 850MW(0.85pu)。将上述数据代入式(12)、(13), 可以计算出 k^* 的具体表达式:

$$k^* = \begin{cases} \frac{0.113}{P_{\text{LCC}} - 1}, & 1.03 < P_{\text{LCC}} \leq 1.254 \\ 0, & 0.97 \leq P_{\text{LCC}} \leq 1.03 \\ \frac{0.112}{1 - P_{\text{LCC}}}, & 0.72 \leq P_{\text{LCC}} < 0.97 \end{cases} \quad (18)$$

6.3.1 风电基地出力增加

图 12 为风电基地出力增加时基本控制与直流



(a) 系统直流电压

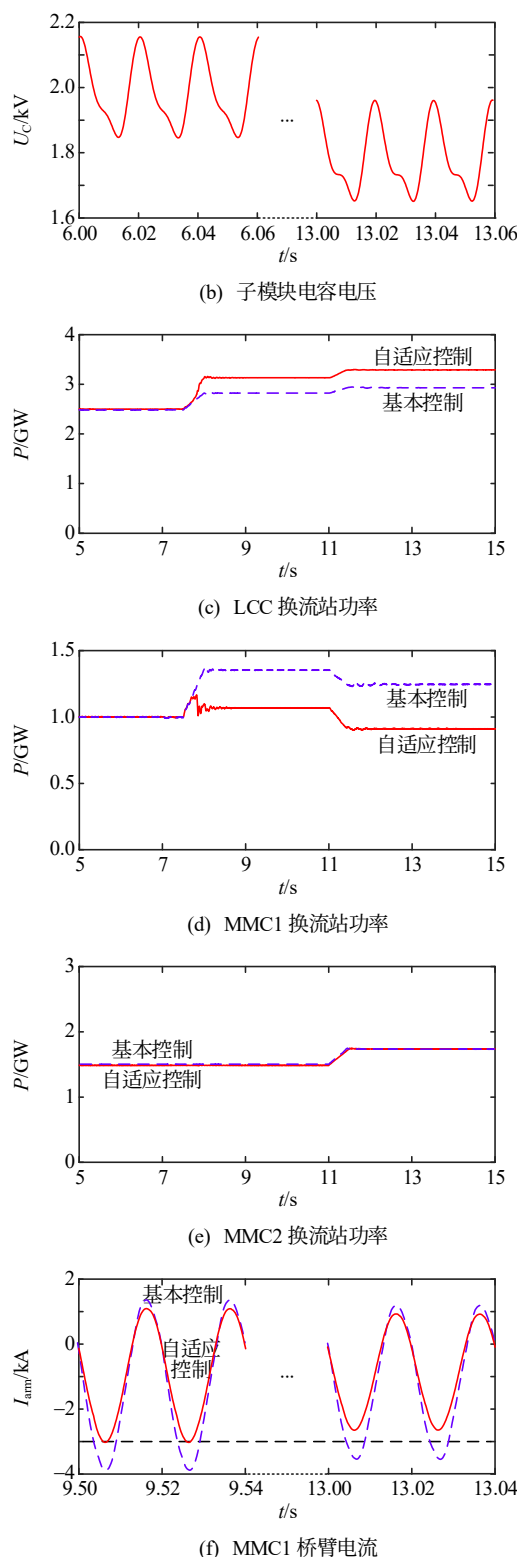


图 12 风电基地出力增加时系统响应

Fig. 12 Response of the system corresponding to increase of power generated by wind farm

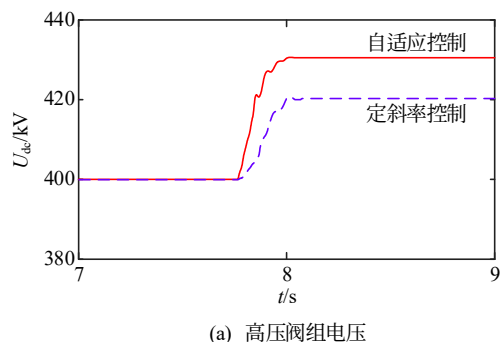
电压自适应控制下的仿真结果。系统稳态运行至 7.5s 时, 风电基地 1 的出力开始上升, 8s 时上升至 4200MW; 11~11.5s, 风电基地 2 的功率由 1500MW 上升至 1750MW。图 12(a)为系统高低压阀组直流

电压的变化情况; 图 12(b)为自适应下垂控制动作前后送端 MMC 换流站子模块电容电压的变化情况; 图 12(c)~(e)分别为各个换流站有功功率的变化情况; 图 12(f)为 MMC1 换流站的 A 相上桥臂电流。

风电基地 1 出力增加导致流经 LCC 换流站的功率上升, 超过上限幅值 P_{high}^* 后, 电压控制启动, 高低压阀组的电压分别稳定在 440、360kV, LCC 与 MMC1 的有功功率稳定在 3135MW 与 1065MW。由于低压阀组电压的下降, 送端 MMC 子模块的电容电压成比例下降。11s 时, 风电基地 2 出力的增加使流经 LCC 换流站的功率进一步上升, 而 MMC1 换流站的功率相应减小, 与系统伏安特性分析一致。此时电压控制环节的输出已经到达上限, 高低压阀组电压不再变化。

由是否配置电压自适应控制的仿真结果对比可知, 基本的协调控制策略下, 风电基地 1 出力增加 700MW, 高低压阀组电压保持不变, 新增功率在 LCC 换流站与 MMC1 换流站间平均分配, 最终 LCC、MMC1 的有功功率稳定在 2850、1350MW。MMC1 换流站承担的有功功率远超出其可以稳定运行的最大功率 1080MW, 导致换流站桥臂过流, 损坏开关器件。而自适应 $P-V$ 下垂控制可调整新增功率在两个换流站间的分配情况, 上升的功率主要由 LCC 承担, MMC1 换流站的有功功率仅有小幅度上升, 可有效避免桥臂过流, 且减少了功率传输损耗。

为了体现在传统定斜率 $P-V$ 控制上引入自适应规则的必要性, 分别验证两种控制环节单独作用下换流站的运行特性。7.5s 时风电基地 1 的出力由 3500MW 上升至 3940MW, 图 13 依次展示了定斜率 $P-V$ 控制与自适应下垂控制下高压阀组的直流电压、LCC 与 MMC1 换流站的有功功率以及 MMC1 换流站桥臂电流的变化情况。



(a) 高压阀组电压

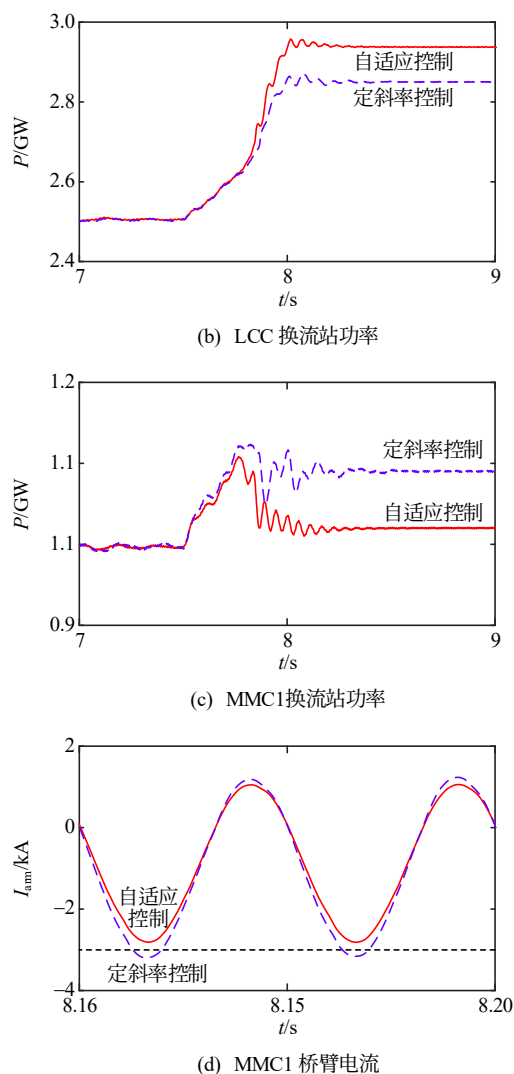


图13 自适应规则必要性验证

Fig. 13 Necessity verification of adaptive rules

从图 13 可以看出, 当风电基地 1 出力由 3500MW 提升至 3940MW 时, LCC 换流站的有功功率上升且超过其上限幅值, LCC 换流站的 $P-V$ 控制启动。若 $P-V$ 控制的斜率固定, 由层级电压及功率分配关系可知, 高压阀组的电压由 400kV 上升至 420kV, LCC 换流站的有功功率将由 2500MW 上升至 2855MW。此时 MMC1 换流站承担 1085MW 的有功功率, 超出其最大额定运行功率, 桥臂电流也超出其安全运行范围, 不利于换流器继续稳定运行。若采用斜率可变的自适应下垂控制, 高压阀组电压将提升至约 430kV, LCC 换流站的有功功率提升至约 2924MW, 相比于定斜率控制均有明显增加。此时 MMC1 换流站承担 1016MW 的有功功率, 在稳定运行范围内。上述仿真结果表明, 本文提出的自适应 $P-V$ 下垂控制充分考虑了各换流器的功率裕度, 当系统出现功率不平衡时能够保证裕度较大

的换流器承担更多的不平衡功率。

6.3.2 风电基地出力减小

图 14 为风电基地出力下降时系统在自适应 $P-V$ 控制下的仿真结果。仿真工况为: 7.5s 时风电基地 2 的出力由 1500MW 下降至 1200MW; 11~11.5s, 风电基地 1 的功率由 3500MW 下降至 2500MW。图 14(a)为自适应 $P-V$ 控制下系统高低压阀组直流电压响应; 图 14(b)为各个换流站有功功率的变化情况; 图 14(c)为自适应 $P-V$ 控制动作前后 LCC 换流站无功功率的变化情况。

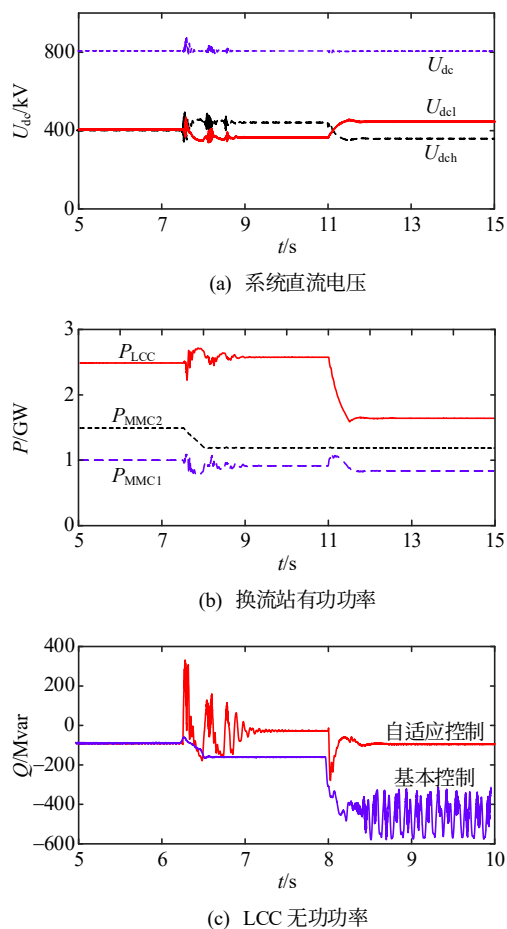


图14 风电基地出力下降时系统响应

Fig. 14 Response of the system corresponding to decrease of power generated by wind farm

风电基地 2 出力下降导致流经 MMC1 换流站的功率上升, 超过动作功率 P_{op} 后, 自适应 $P-V$ 控制的附加控制环节投入, 高压阀组电压指令值上升。8.5s 时, 高低压阀组的电压分别稳定在 440、360kV, LCC、MMC1 的有功功率稳定在 2585、915MW。

11s 时风电基地 1 出力的下降使流经 LCC 与 MMC1 换流站的功率均下降。当 MMC1 换流站的

功率下降至低于返回功率时, 附加控制环节退出, 随后下限幅环节投入, 高压阀组电压指令值下降。11.5s 时, 高低压阀组的电压分别稳定在 360、440kV, LCC、MMC1 的有功功率稳定在 1665、835MW。由图 14(c)的对比可知, 若仅采用基本控制, 风电基地 1 出力下降 1000MW 后, LCC 换流站无功过剩高达 500MW, 且大幅振荡, 系统控制难以维持稳定。而采用自适应电压控制后, LCC 换流站通过增大触发角吸收多余无功, 维持系统稳定。

7 结论

本文将混合直流输电系统与分层接入结构相结合, 提出了一种适用于多规模新能源基地直流汇集与输送的分层接入-混合级联直流输电系统, 为新能源大规模远距离输送提供了一种新选择, 其主要特点有:

1) 混合级联输电系统综合了 LCC 换流器与 MMC 换流器的优势, 可以实现新能源大规模远距离输送。

2) 混合级联输电系统分层接入的结构可以实现地理位置上有一定距离且规模不同的多个风电基地直流汇集与输送, 提升输电效率与电网灵活性。相比于传统的交流汇集方案, 减少了升压变压器的使用, 具有良好的经济性。

3) 提出的阀组电压自适应下垂控制可根据系统具体的运行工况自适应调节 $P-V$ 控制的斜率系数, 使系统在较大范围内有效应对风电基地的功率波动, 同时实现了功率裕度较大的换流器承担更多的调节任务。

4) 分层混联输电系统具有交直流故障穿越能力, 该系统的多种扩展结构能够实现直流故障自清除以及无闭锁直流故障穿越。

参考文献

[1] XIANG Wang, YANG Ruizhang, LIN Chang, et al. A cascaded converter interfacing long-distance HVDC and back-to-back HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4109-4121.

[2] 周猛, 向往, 左文平, 等. 应对柔性直流电网线路故障的混合型 MMC 直流电压目标预设控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5015-5024.

ZHOU Meng, XIANG Wang, ZUO Wenping, et al. DC voltage target predetermined control of hybrid MMC to handle line fault of overhead DC grid[J]. Proceedings of

the CSEE, 2019, 39(17): 5015-5024(in Chinese).

[3] LIU Yichao, LI Sunwei, CHAN P W, et al. Empirical correction ratio and scale factor to project the extreme wind speed profile for offshore wind energy exploitation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1030-1040.

[4] 常怡然, 蔡旭. 低成本混合型海上风电场直流换流器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5821-5828.

CHANG Yiran, CAI Xu. Cost-effective hybrid HVDC converter for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5821-5828(in Chinese).

[5] 杨仁炘, 施刚, 蔡旭, 等. 风电-多端柔送出系统电压源型控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1498-1508.

YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu, et al. Voltage source control of VSC-MTDC systems with wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1498-1508(in Chinese).

[6] YU Lujie, LI Rui, XU Lie. Distributed PLL-based control of offshore wind turbines connected with diode-rectifier-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1328-1336.

[7] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-378.

CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-378(in Chinese).

[8] 鲁双杨, 林卫星, 姚良忠, 等. 直流-直流自耦变压器互联 LCC-HVDC 的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2507-2515.

LU Shuangyang, LIN Weixing, YAO Liangzhong, et al. Research on interconnecting two LCC-HVDC through DC-DC autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2507-2515(in Chinese).

[9] 杨之翰, 李梦柏, 向往, 等. 基于无闭锁直流自耦变压器的 LCC-HVDC 与 VSC-HVDC 互联系统[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 499-510.

YANG Zhihan, LI Mengbo, XIANG Wang, et al. Research on the interconnection system of VSC-HVDC and LCC-HVDC based on un-interrupted DC-DC autotransformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 499-510(in Chinese).

[10] 郭小江, 赵丽莉, 汤奕, 等. 风火打捆交直流外送系统功角暂态稳定研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 19-25.

GUO Xiaojia, ZHAO Lili, TANG Yi, et al. Study on angle transient stability for wind-thermal-bundled power

- transmitted by AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 19-25(in Chinese).
- [11] LIN Weixing, WEN Jinyu, LIANG Jun, et al. A three-terminal HVDC system to bundle wind farms with conventional power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2292-2300.
- [12] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.
- XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99(in Chinese).
- [13] BOZHKO S V, BLASCO-GIMENEZ R, LI Risheng, et al. Control of offshore DFIG-based wind farm grid with line-commutated HVDC connection[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 71-78.
- [14] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 23-29.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 23-29(in Chinese).
- [15] 张峻樑, 向往, 饶宏, 等. 含直流断路器的架空柔性直流电网直流故障保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4631-4645.
- ZHANG Junjie, XIANG Wang, RAO Hong, et al. Research on DC fault protection scheme of overhead mmc based DC grid with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4631-4645(in Chinese).
- [16] 向往, 林卫星, 文劲宇, 等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5171-5179.
- XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking capability and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5179(in Chinese).
- [17] 韩平平, 陈凌琦, 丁明, 等. 一种适用于风电外送的混合高压直流输电系统[J]. 太阳能学报, 2019, 40(8): 2162-2169.
- HAN Pingping, CHEN Lingqi, DING Ming, et al. A kind of hybrid HVDC transmission system suitable for wind power connection[J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(8): 2162-2169(in Chinese).
- [18] 林卫星, 文劲宇, 王少荣, 等. 一种适用于风电直接经直流大规模外送的换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2022-2030.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, WANG Shaorong, et al. A kind of converters suitable for large-scale integration of wind power directly through HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2022-2030(in Chinese).
- [19] 姚良忠, 刘艳章, 杨波, 等. 大规模新能源发电集群直流汇集及输送方案研究[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 36-43.
- YAO Liangzhong, LIU Yanzhang, YANG Bo, et al. Research on DC collection and transmission for large scale renewable energy generation clusters[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 36-43(in Chinese).
- [20] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 211-229.
- XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren, et al. Voltage source converter based HVDC power transmission systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 211-229(in Chinese).
- [21] YAO Yao, DENG Wei. Zhangbei flexible HVDC project starts product bidding[EB/OL]. (2018-04-01). http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2018/4/1/79e33f53-42ec-473a-8e9f-4a390c398071.pdf.
- [22] YAO Yao. Wudongde HVDC project starts product bidding[EB/OL]. (2018-09-05). http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201809061189641375_1.pdf.
- [23] 王晓晖, 温卫宁, 王承民, 等. 动态无功补偿装置经济性分析及价格机制研究[J]. 机电信息, 2018(9): 92-95, 97.
- WANG Xiaohui, WEN Weining, WANG Chengmin, et al. Economic analysis and price mechanism research of dynamic reactive power compensation device[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(9): 92-95, 97(in Chinese).
- [24] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011: 106-109.
- ZHAO Xianjun. HVDC transmission engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 106-109(in Chinese).
- [25] 林卫星, 文劲宇, 艾小猛, 等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 38-46.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, AI Xiaomeng, et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 38-46(in Chinese).
- [26] 鲁晓军, 林卫星, 安婷, 等. MMC 电气系统动态相量模型统一建模方法及运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5479-5491.
- LU Xiaojun, LIN Weixing, AN Ting, et al. A Unified dynamic phasor modeling and operating characteristic analysis of electrical system of MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5479-5491(in Chinese).
- [27] XIANG Wang, LIN Weixing, XU Lie, et al. Enhanced

- independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [28] 杨仁炘, 施刚, 蔡旭, 等. 风电场柔性直流并网控制保护技术现状与展望[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 48-57.
- YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu, et al. Present situation and prospect of the control and protection technology for flexible DC intergration of wind farm[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 48-57(in Chinese).
- [29] 邓秋玲, 姚建刚, 黄守道, 等. 直驱永磁风力发电系统可靠性技术综述[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 144-151.
- DENG Qiuling, YAO Jiangang, HUANG Shoudao, et al. An overview on reliability technology for direct drive permanent magnet wind power generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 144-151(in Chinese).
- [30] 刘启建, 杨美娟, 行登江, 等. 风电场经柔性直流孤岛送出的交流故障联合穿越策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 132-141.
- LIU Qijian, YANG Meijuan, XING Dengjiang, et al. Coordinated AC fault ride through strategy for wind farm connected to VSC-HVDC system by island[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 132-141(in Chinese).
- [31] HANSEN A D, MICHALKE G. Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(3): 333-348.
- [32] 董旭, 张峻樾, 王枫, 等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 48-55.
- DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC fault ride-through technology for wind power integration via VSC-HVDC overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 48-55(in Chinese).
- [33] 曹帅, 向往, 左文平, 等. 风电经柔性直流电网外送系统的交流故障诊断与穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1295-1306.
- CAO Shuai, XIANG Wang, ZUO Wenping, et al. AC fault diagnosis and ride-through control strategy for the wind power delivery system via HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1295-1306 (in Chinese).
- [34] 徐政, 王世佳, 李宁璨, 等. 适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 55-63.
- XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 55-63(in Chinese).



孟沛彧

在线出版日期：2020-11-13。

收稿日期：2020-05-20。

作者简介：

孟沛彧(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统建模与控制, pennymeng1@foxmail.com;

*通信作者：向往(1990), 男, 博士, 研究方向为直流电网, xiangwang1003@foxmail.com。

(责任编辑 李泽荣)

A Hierarchical LCC-MMC Hybrid Transmission System for Transmitting Large-scale Renewable Power Over Long-distance

MENG Peiyu¹, XIANG Wang^{1*}, CHI Yongning², WANG Zhibing², JING Jiangping³, WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology); 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute); 3. State Grid Jiangsu Power Company)

KEY WORDS: hybrid HVDC transmission system; cascaded converter; hierarchical access; renewable energy transmission; adaptive droop control

Wind power has become a mainstream source of clean, cost-competitive energy around the world in the last decades. In 2019, 60.4GW wind energy capacity has been installed globally.

To achieve the collection and long-distance transmission of large-scale onshore renewable energy sources such as wind power, this paper proposed a hybrid cascaded DC transmission system suitable for the hierarchical access of multiple wind power bases with different scales.

The topology of the hierarchical access-hybrid cascade transmission system is shown in Fig. 1. The rectifier of the HVDC system consists of one LCC and two MMCs. The LCC serves as the upper valve and it is paralleled with MMC1 at the AC side. Two MMCs are paralleled at the DC side. By means of this cascaded converter scheme, the AC voltage of winds farms at the point of common coupling (PCC) are maintained by the MMCs. To avoid commutation failure problems, the receiving end of the hybrid HVDC system adopts the

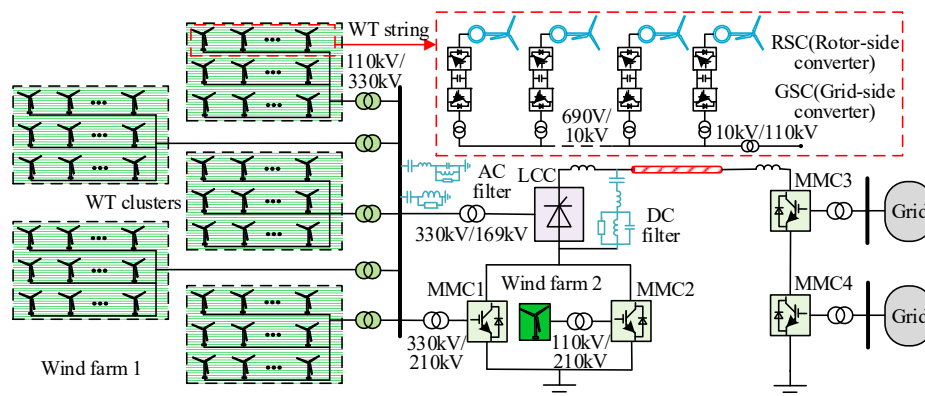


Fig. 1 Topology of the hierarchical access-hybrid cascade transmission system

MMC technology.

The large wind farms are connected with the LCC and one MMC valve, and the small wind farm are directly connected with MMC2, and thus providing a cost-effective solution for integrating different scales of wind farms. Despite this, the hierarchical integration scheme will benefit from flexible operation and high efficiency.

In response to the wind farm output fluctuations, the adaptive P - V droop control is designed to ensure the stable operation of the system, as shown in Fig. 2. The upper, lower and additional control loops represent the three control stages.

A simulation model of the hierarchical hybrid

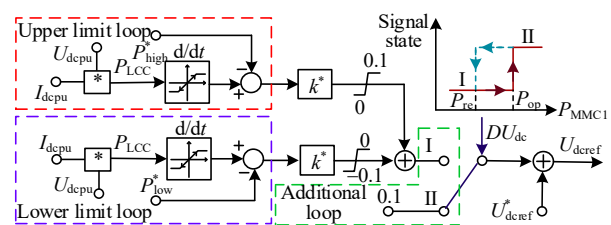


Fig. 2 Adaptive P - V droop control loop

cascaded HVDC transmission system is built in PSCAD/EMTDC to verify the effectiveness. The research results show that the hierarchical integration HVDC system has a potential application prospect in the long-distance transmission of large-scale wind power.