

• 新型电力系统 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202200520



本刊网刊

大规模光伏电站经柔性直流并网系统故障穿越策略

孙银锋¹, 李 溶^{1*}, 刘金鑫¹, 李国庆¹, 王振浩¹, 吴学光^{2,3}

(1.现代电力系统仿真控制与绿色能源新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012; 2.全球能源互联网研究院, 北京 102211;
3.直流电网技术与仿真北京市重点实验室, 北京 102211)

摘 要:大规模光伏经柔性直流并网系统采用直流架空线路是未来新能源并网的趋势之一。然而, 架空线直流短路故障发生概率较大, 极易导致光伏电站脱网或换流站电力电子器件损坏。本文首先根据柔性直流输电系统、光伏电站特性, 建立了相应的数学模型及仿真系统模型; 其次, 针对大容量光伏经双极模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的高压直流功率传输系统发生直流架空线路单极短路接地故障工况, 分析其故障特性; 最后, 提出综合考虑直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB), 换流站控制方式, 光伏电站功率出力控制的直流故障穿越的协调控制策略。即故障发生时利用非故障极换流站继续进行功率传输, 根据换流站额定功率与光伏电站输出功率计算得到不平衡功率, 充分利用光伏阵列自身功率输出特性, 优化光伏电站内的直流线路电压, 实现控制光伏电站输出功率减载; 对直流架空线路在瞬时故障情况下的故障穿越问题, 提出了光伏电站减载以及换流站功率前馈增量控制, 从而维持系统功率平衡, 提高系统的并网稳定性; 基于PSCAD/EMTDC的建模仿真, 通过故障穿越措施前后的系统参数对比, 表明所提方法能够有效地维持光伏电站与柔性直流系统运行特性, 平稳实现故障穿越。

关键词:光伏电站; 故障穿越; 柔性直流

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2023)02-0107-10

Fault Traversal Strategy for Large-scale Photovoltaic Power Station via Flexible DC Grid-connected System

SUN Yinfeng¹, LI Rong^{1*}, LIU Jinxin¹, LI Guoqing¹, WANG Zhenhao¹, WU Xueguang^{2,3}

(1.Modern Power System Simulation Control and Green Energy New Technol. Key Lab. of the Ministry of Education (Northeast Electric Power Univ.), Jilin 132012, China; 2.Global Energy Interconnection Research Inst., Beijing 102211, China;
3.Beijing Key Lab. of DC Power Grid Technol. and Simulation, Beijing 102211, China)

Abstract: Large-scale PV adopts DC overhead lines for flexible DC grid connection is one of the trends of new energy grid-connected in the future. However, the high probability of DC short-circuit fault of overhead line can easily lead to the disconnection of photovoltaic power stations or the damage of power electronic devices in converter stations. To solve this problem, firstly, according to the characteristics of flexible direct current transmission system and photovoltaic power station, the corresponding mathematical and simulation system model were established. Secondly, in view of the single-pole short-circuit grounding fault condition of DC overhead line in the high-voltage DC power transmission system with large-capacity PV through bipolar modular multilevel converter, the fault characteristics were analyzed. Finally, considering the control mode of DC circuit breaker and converter station, as well as the power output of photovoltaic power station comprehensively, the coordinated control strategy of DC fault traversal were proposed. That is, when a fault occurs, the power transmission is continued by using the non-fault pole

收稿日期:2022-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(U2066208)

作者简介:孙银锋(1983—),男,副教授,博士。研究方向:柔性直流输电稳态分析控制与故障抑制。E-mail: sunyinfeng@neepu.edu.cn

*通信作者:李 溶, E-mail: 2206934870@qq.com

网络出版时间:2023-01-03 12:03:06

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20230102.1004.005.html

converter station, and the unbalanced power is calculated according to the rated power of the converter station and the output power of the photovoltaic power station. By making full use of the power output characteristics of the photovoltaic array, the DC line voltage in the photovoltaic power station is optimized, and the output power of the photovoltaic power station is reduced. To solve the problem of DC overhead line fault traversal under instantaneous failure, the load reduction of photovoltaic power station and power feed-forward incremental control of converter station were proposed, so as to maintain the power balance of the system and improve the grid connection stability of the system. Based on the simulations on PSCAD/EMTDC, the comparison of system parameters before and after fault traversal measures shows that the proposed method can effectively maintain the operating characteristics of photovoltaic power station and flexible DC system, and smoothly achieve fault traversal.

Key words: photovoltaic power station; fault ride through; high voltage direct current

在碳达峰与碳中和的总目标下,构建以新能源为主体的新型电力系统已经成为电力体制改革的主要手段^[1]。光伏发电将会逐步成为基础电力能源支柱^[2]。中国光伏发电目前以集中式大容量光伏电站为主^[3],主要集中在太阳能资源丰富而电力消纳能力较弱的西北地区,需将光伏发电远距离传输到电力负荷大、电力资源较少的东南地区^[4-6]。基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)在传输远距离大容量光伏资源时具有输出电压质量好、谐波含量低、开关损耗低,并实现更大容量更高电压的功率传输^[7]。为节约系统建设成本,常采用架空线做为MMC-HVDC的直流功率传输线路^[8-9]。而直流架空线路发生直流短路故障的概率较高,且柔性直流系统阻尼小,故障电流上升速度快,峰值可达到数十千安,对电网中器件造成严重损坏^[10]。

因此,为提高电网运行的稳定性,对如何加强电网对新能源的消纳能力,改进光伏能源发电接入电网时的故障穿越及动态调节能力,提高光伏经MMC-HVDC并网直流故障穿越能力进行研究迫在眉睫。

目前在光伏经柔性直流并网系统故障穿越方面已开展了一些研究。武承杰等^[11]基于并网侧交流故障,分析了无功参考值与电压跌落之间的关系,提出一种电流限幅策略及无功参考值计算方法;但仅考虑故障时的并网点电压,并未研究光伏直流线路电压稳定程度。Benhalima等^[12]构建了一种基于VSC-HVDC的光伏中央发电连接海上风电系统,并通过使用修改后的Adaline算法提升整个系统的直流故障穿越能力;但研究仅局限于逆变器本身的控制,未对光伏与风电自身发出功率做了调整。高海力^[13]在单端光伏接柔直并网系统,利用含超级电容储能的光伏电站为发生交流故障时的系统提供无功补偿,使光伏电站在故障结束后快速恢复有功输出;采用模型为单端MMC连接光伏,可传输能量较低,光伏直流电压要求较高。王雨虹等^[14]在两端光伏接VSC-HVDC系统拓扑结构中,在直流线路上附加硬件耗能电路消耗因并网点交流故障产生的不平衡功率,并协同

无功补偿装置使光伏系统能够平稳穿越故障,加强了供电系统稳定性;但未能根据故障类型投切不同耗能电阻,因此无法实现大规模光伏功率传输。朱惠君^[15]分析单端光伏经MMC并网系统交直流故障时的电流特性,并在故障特征基础上提出了换流站故障识别判据;分析了直流故障后直流线路的电压特征,提出了换流站交直流保护的协调配合策略,实现了快速识别交、直流故障;但仅对故障识别速度进行改进,未就故障穿越能力进行研究。石肖鹏^[16]针对两端光伏接VSC-HVDC功率传输系统,在光伏电站出口发生交流短路接地的情况,对光伏电站内逆变器进行功率调节,改变有功无功输出,保证光伏电站连接VSC-HVDC的稳定;但对并网系统影响最大的直流架空线路短路接地故障未采取保护措施。

上述研究大多集中在光伏经VSC-HVDC交流侧短路故障穿越,或光伏经单端MMC并网短路故障穿越。对光伏经双极MMC-HVDC并网的直流短路故障研究目前较少。

针对上述问题,本文分析了大容量光伏电站经两端双极MMC-HVDC功率传输系统发生单极短路接地故障时的故障特性,并提出1种应用于光伏经双极MMC-HVDC的新型直流短路故障穿越策略,故障后直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)将故障信号传递给MMC与光伏电站;故障极MMC闭锁并向并网点增加基于电压跌落计算的无功增量控制,与此同时光伏电站进行基于直流电压越限的光伏功率减载控制。通过协调控制,功率传输系统在故障时可以保证交直流线路电压稳定,各电力电子器件安全,并且故障结束后可以重合闸成功,光伏无需脱网,保证系统功率输送稳定。最后基于PSCAD/EMTDC搭建仿真系统模型,验证所提故障穿越策略的有效性。

1 光伏经MMC-HVDC并网系统模型建立

1.1 并网拓扑

以光伏经双极MMC-HVDC并网系统模型为例,研究直流架空线路短路故障穿越能力,系统拓扑结

构如图1所示。图1中:系统拓扑主要由大规模光伏电站、变压器、受端PMMC、送端GMMC、直流断路器及交流系统构成;MMC换流站分别为正负极两个半桥型MMC串联,单个MMC拓扑结构如图2所示,对称三相桥臂均由N个子模块和桥臂电抗器L串联而构成^[17]。

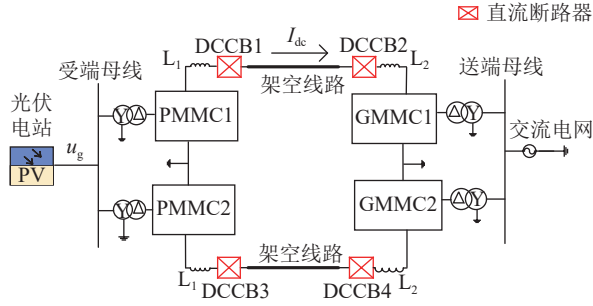


图1 光伏经MMC-HVDC并网系统图

Fig. 1 System diagram of photovoltaic grid-connected via MMC-HVDC

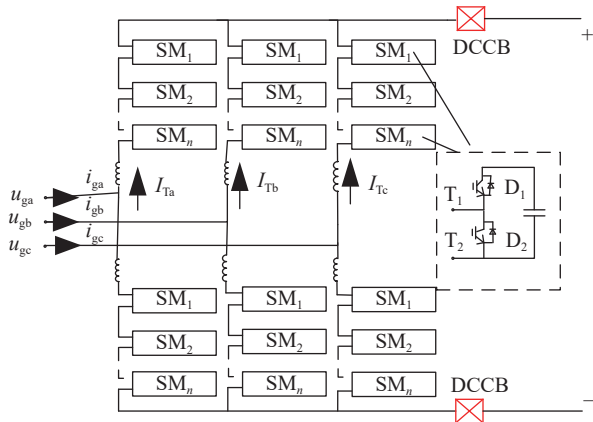


图2 MMC拓扑结构图^[17]

Fig. 2 MMC topology diagram^[17]

光伏电站采用如图3所示的双级式结构,光伏阵列出口电压 U_{pv} 与电流 I_{pv} 经DC-DC升压变换器改变直流电压至 U_d ,直流电流至 I_d ;最大功率跟踪(maximum power point tracing, MPPT)环节由 U_{pv} 与 I_{pv} 计算出最大功率输出参考电压 U_{mppt} ;最后通过逆变器逆变和LCL滤波器滤波将功率输入MMC-HVDC系统。

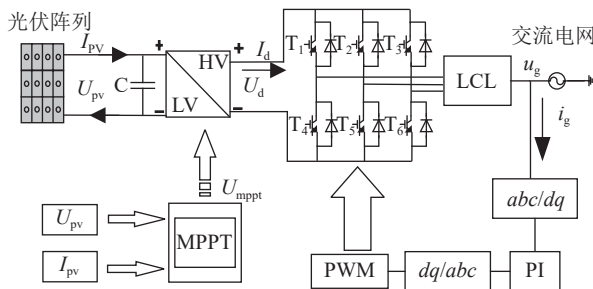


图3 光伏电站结构图

Fig. 3 Structure diagram of photovoltaic power station

1.2 控制方式

1.2.1 光伏电站控制策略

光伏电站并网逆变器通过使用内外环控制,将有功率和无功率进行解耦,使光伏电站输出功率保持稳定。在逆变器出口处电压下降或者上升时,以PLL锁相环节对逆变器出口处电压的相位进行跟踪。并且将光伏阵列输出功率矢量解耦后,其功率方程如式(1)所示^[18]:

$$\begin{cases} P_g = u_{gd}i_{gd} + u_{gq}i_{gq} = u_g i_{gd}, \\ Q_g = u_{gq}i_{gd} + u_{gd}i_{gq} = -u_g i_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_g 和 Q_g 分别为光伏电站输出有功功率和无功功率, u_g 为并网点电压, u_{gd} 和 u_{gq} 分别为 u_g 的d轴和q轴分量, i_{gd} 和 i_{gq} 分别为并网点电流 i_g 的d轴和q轴分量。

由式(1)可知,分别控制 i_{gd} 和 i_{gq} 可实现单独控制光伏电站输出的有功功率或无功功率^[19],从而控制 u_g 的稳定。

1.2.2 MMC换流站控制策略

传输光伏电站输出功率的双极MMC-HVDC系统拓扑采用对称双极接线方式,在正负极两个串联的MMC中间引出接地极,当其中一极发生故障后,故障极直流断路器动作,隔离故障的同时故障极MMC闭锁使故障极退出运行,非故障极可以通过大地形成回路,保证系统可以不脱网,正常传输功率^[20]。

本文的MMC控制策略采用直接电流控制,通过跟踪有功功率,直流电压和无功功率,交流电压等参数并计算内环电流控制参考值,实现控制换流器输出电压、电流。

为使直流输电线路的直流电压稳定和方便调节系统中的无功功率,送端MMC换流站采用直流电压控制与交流电压控制,其控制方式如图4所示。根据直流架空线路的直流电压 E_{dc} 与直流电压参考值 E_{dref} 差值计算电流外环参考值 i_{dref} ,实现直流架空线路电压稳定;根据电网交流电压 u_{ac} 与参考值电压 u_{acref} 计算电流内环参考值 i_{qref} ,实现并入电网电压稳定^[21]。

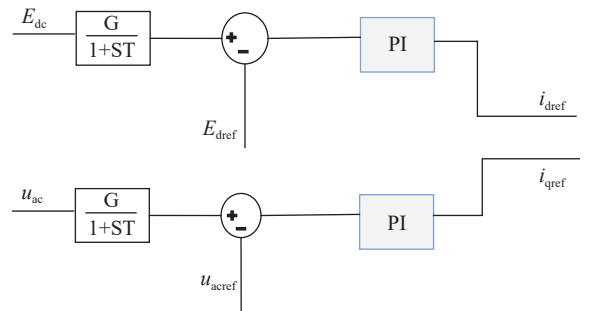


图4 定直流电压控制与定交流电压控制图

Fig. 4 Diagram of constant DC voltage control and constant AC voltage control

为维持系统中传输功率的稳定,受端MMC换流站采用有功功率控制和无功功率控制,控制方式如图5所示。根据光伏电站并网输入有功功率 P_g 与有功参考值 P_{gref} 的差计算电流外环参考值 i_{dref} ,并引入直流电压 E_{dc} 计算量防止 E_{dc} 越限,实现有功功率稳定输送;根据光伏电站并网输入无功功率 Q_g 与无功参考值 Q_{gref} 之差计算电流内环参考值 i_{qref} ,保证并网无功功率稳定^[22]。

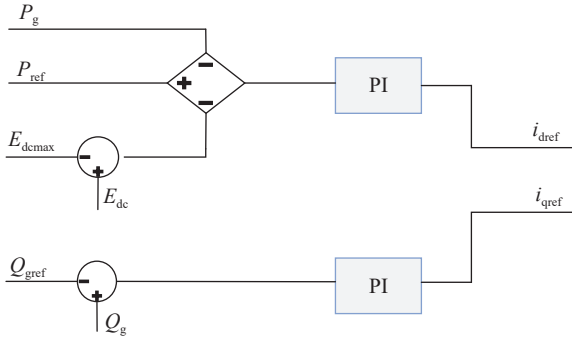


图5 有功功率控制和无功功率控制图

Fig. 5 Constant active power control and constant reactive power control diagram

2 光伏柔直并网直流故障穿越策略

2.1 直流故障分析

本文研究目标为图1所示模型直流架空线路发生单极短路接地故障。当故障发生时,故障极换流站导通的子模块电容如图6所示,电容迅速向短路点放电,电容电压 V_{cn} 快速下降,使直流架空线路电流快速上升;故障极MMC换流器中断功率传输,光伏电站交流侧出口相当于发生三相短路故障;并且由电容与短路点放电形成的直流分量及光伏电站交流侧出口形成的短路分量桥臂电流迅速上升^[23]。

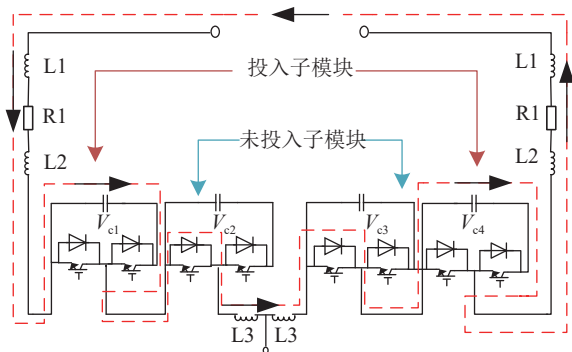


图6 闭锁前子模块电流通路^[23]

Fig. 6 Sub-module current path before latching^[23]

由上述故障分析可得,当直流线路故障发生后,需要快速将故障极的MMC闭锁,使MMC内部子模块停止放电,防止MMC中开关器件过流。

但是,在换流器闭锁后如图7所示桥臂电感仍会

同MMC内部子模块中的二极管形成回路,并向直流架空线路释放剩余能量,且剩余能量释放结束(桥臂电流衰减接近0)时,MMC以不可控整流方式在直流侧短路情况下运行。所以需要通过直流断路器动作,在换流站闭锁前切断直流架空线路中的故障电流^[24]。

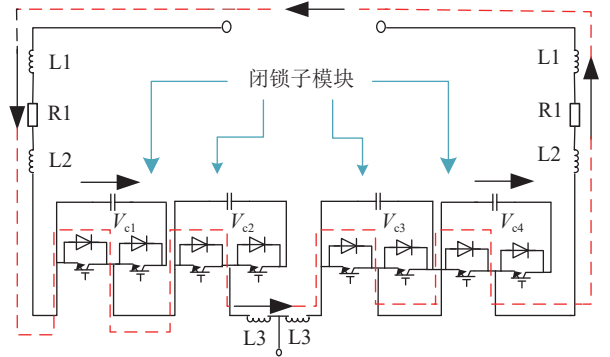


图7 闭锁后子模块电流通路示意图^[24]

Fig. 7 Schematic diagram of the current path of the sub-module after blocking^[24]

当双极直流架空线路的某一极发生短路接地故障时,短路点同时向受端和送端换流器传播故障行波。通过分析行波中的行波电流、行波电压所含的故障信息,快速检测出故障类型,同时故障极换流器快速做出相应动作隔离故障,并且将故障极换流器快速闭锁,从而让故障极停止功率传输^[25]。

此时,为保持系统传输功率的安全及直流线路运行的稳定,非故障极线路需要保持继续运行且消纳光伏电站输出功率。但是若出现光伏电站输出功率大于非故障极MMC允许最大功率的工况时,光伏电站需要根据式(2)快速减小输出功率,并调整换流站输出的无功功率以减小光伏电站出口处交流电压跌落。

由于故障时光伏电站逆变器出口相当于发生三相短路,所以故障时发生输出电压 u_g 下降,同时电流 i_g 上升;但是为保护逆变器中的电力电子器件,实际应用中逆变器控制一般加有限流措施^[26]。所以,光伏电站输出功率会有一定幅度的减小,而光伏阵列输出功率没有变化。根据式(2)可知,故障时会产生堆积在光伏阵列出口的直流线路上的冗余功率 ΔP_1 ,使光伏阵列出口直流线路的直流电压 U_d 显著上升。

$$\Delta P_1 = S_{\text{pv}} - S_{\text{MMC}} \quad (2)$$

式中, S_{pv} 为光伏阵列输出功率, S_{MMC} 为光伏电站传输到受端MMC的功率。

所以,为缓解不平衡功率对受端电网频率和电压的影响,以及保护非故障极换流器子模块电容不会因未消纳功率而过电压损坏,防止光伏电站内直流电压越限,得到对故障穿越策略有效性研究的关

键问题为:直流架空线路短路接地故障后,非故障极功率稳定传输,故障极成功重合闸后传输功率稳定恢复问题,和光伏电站同MMC-HVDC的送端换流站协同穿越控制问题。

2.2 故障穿越策略

根据两端双极型MMC-HVDC发生直流单极短路接地故障时的故障特性可知,为维持系统功率传输安全,需要非故障极以额定功率运行,光伏电站减少一定功率,减少量为不平衡功率 ΔP_1 ,受端非故障极换流站需要向并网点提供无功功率。因此,本文提出一种基于光伏电站内直流电压越限稳定的光伏减载控制与换流站前馈无功补偿控制协同故障穿越措施。

2.2.1 光伏电站减载策略

光伏阵列在MPPT系统控制下通常运行在最大功率输出点,在系统接受到减载信号后通过改变光伏电站DC-DC升压变比系数来改变直流电压 U_{pv} ^[27],使系统运行在小于最大功率点处,减少光伏阵列输出功率。系统可在不改变系统拓扑和不增加经济投资的情况下实现直流故障穿越。

在实际工程应用中,在一定光照和温度情况下,光伏发电系统会根据最大功率跟踪得到光伏阵列能够输出最大功率时对应的端口电压,并且通过DC-DC直流斩波电路将端口电压调整为最大功率对应电压,使光伏资源得到最大程度的应用^[28]。

因为在MMC-HVDC单极接地短路故障发生后,由于冗余功率,光伏电站内的直流线路电压会上升,为保护直流线路安全运行,且降低光伏阵列输出功率,需要在最大功率跟踪的计算流程中增加计算量 K_t 、 $F(x)$,从而改变boost电路中直流电压的变比系数,实现输出功率大小的调整。整体控制策略如图8所示。

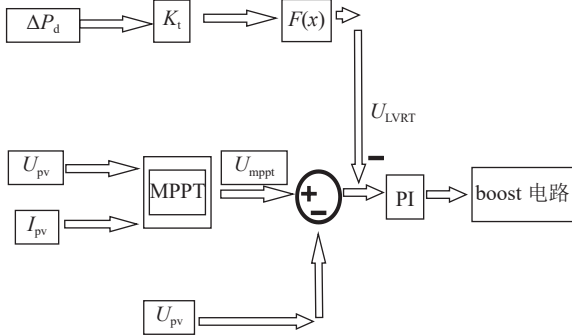


图8 减载控制策略图

Fig. 8 Load shedding control strategy diagram

图8中, $F(x)$ 的取值是基于对光伏电站高压侧直流线路额定电压 U_{dN} 的波动。在电压 U_d 大于 $1.1U_{dN}$ 时,系统在故障时不能消纳冗余功率,使 U_d 越限, $F(x)=1$,光伏最大功率跟踪控制环节加入减载信号;当 U_d 小

于 $1.1U_{dN}$ 时,系统可以吸收故障时产生的冗余功率,使 U_d 不越限, $F(x)=0$,光伏功率 P_{pv} 输出保持在最大功率点。

在保证光伏电站施加减载控制后,能够在故障隔离或者消除后及时返回最大功率跟踪控制,实现最大功率输出。最大程度避免对光伏资源的浪费。

K_t 的取值是基于光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线,如图9所示^[29]。图9中,在一定温度和光照下,光伏需减小输出 ΔP_1 的能量,使输出最大功率 P_{max} 降至系统可进行故障穿越的功率 P_{LVRT} 时;光伏最高功率输出相应的电压 U_{pvh} 需要减小 ΔU_1 至 U_{pvl} , ΔP_1 与 ΔU_1 之间关系为: $\Delta U_1 = K_t \cdot \Delta P_1$ 。

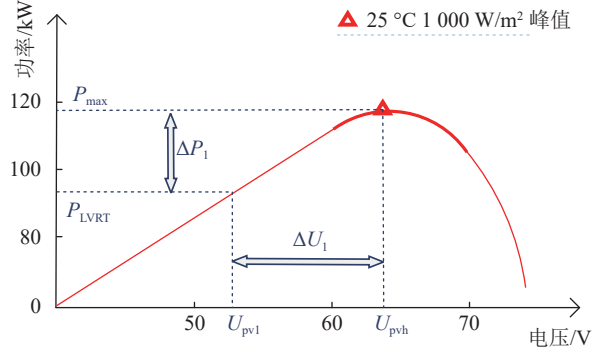


图9 光伏 $P-U$ 特性曲线图^[29]

Fig. 9 Photovoltaic power voltage characteristic diagram^[29]

2.2.2 换流站前馈控制协同穿越策略

在光伏电站进行减载控制的同时,若 u_g 跌落过大则光伏电站减载后的输出功率无法稳定传输,并且光伏电站有低电压情况脱网风险,使非故障极也未能进行功率传输,系统失去输出功率能力,电网受比较强的功率波动性影响。

因此,受端非故障极MMC也需要调节无功功率输出功率。由于受端MMC采用有功控制与无功控制,所以可以在无功控制环内增加一个前馈增量以改变无功参考值,实现非故障极MMC无功功率输出的调整,使非故障极MMC向电压 u_g 提供无功支撑。

无功前馈控制流程如图10所示。图10中, Δu_g 为由电压 u_g 相对于额定电压 u_{gN} 下降程度计算的前馈量如式(3)所示。

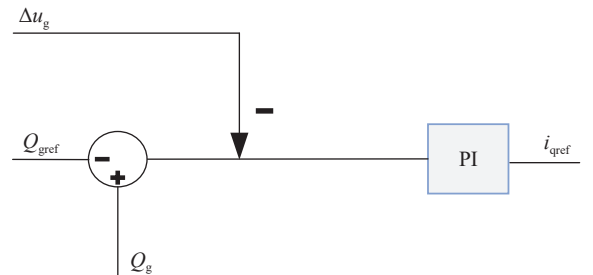


图10 无功前馈控制流程图

Fig. 10 Flowchart of reactive power feedforward control

在计算中加入 K_p 调节量,且在穿越过程中交流电压 u_g 大于限定值 u_{gmax} 时, K_p 归零。维持光伏电站出口电压使其能够稳定连接双极MMC-HVDC功率传输系统。

$$\Delta u_g = K_p(u_g - u_{gN}) \tag{3}$$

受端非故障极MMC换流器的额定容量满足式(4):

$$S_{mmc2}^2 = P_{mmc2}^2 + Q_{mmc2}^2 \tag{4}$$

式中, P_{mmc2} 、 Q_{mmc2} 分别为MMC换流器有功功率和无功功率。由式(4)可知,MMC换流器的视在功率 S_{mmc2} 值一定时,针对MMC换流器向并网处输出的无功功率 Q_{mmc2} 增加,MMC换流器输送到直流架空线路的功率也会有相应的减少量,且由于直流架空线路传输功率 $P_{dc} = E_{dc}I_{dc}$,其中, I_{dc} 为直流架空线路电流,即故障发生时直流架空线路的直流电压和直流电流上升量也会下降。

综上可得,当光伏经双极MMC-HVDC的功率传输系统发生单极接地短路故障时,故障协调穿越措施详细流程如图11所示。

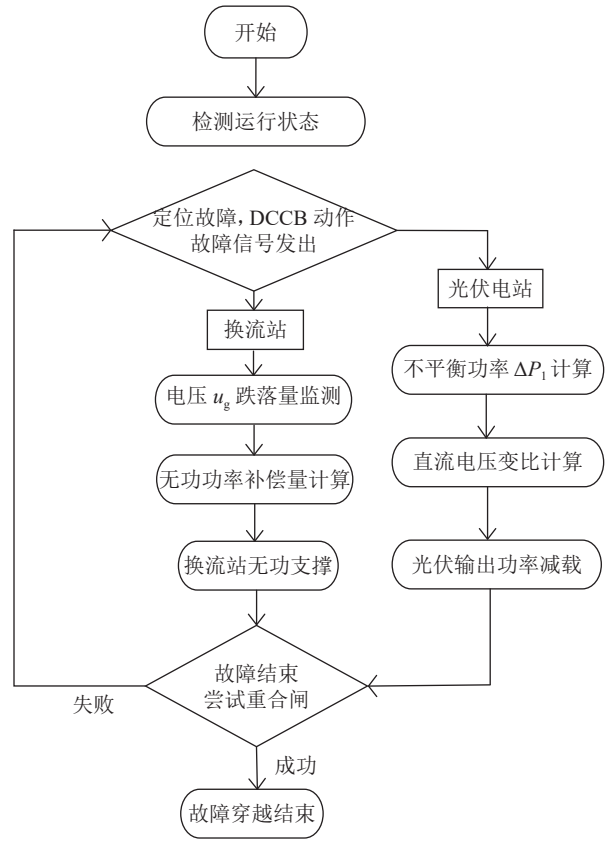


图 11 直流故障协调穿越流程图

Fig. 11 Flowchart of DC fault coordinated ride-through

图11中,穿越措施可分为3部分协同控制:第1部分为DCCB检测到直流故障后发出故障穿越信号并隔离故障电流,将故障极换流器闭锁,消除桥臂电流;

第2部分为非故障极换流站接到故障穿越信号后,换流器的无功功率控制增加前馈控制;第3部分非故障极换流站接到故障穿越信号后,计算不平衡功率值,并将信号值传递给光伏电站,光伏电站进行减载控制,使系统功率传输达到平衡,电网电压频率达到稳定。

3 仿真验证

为验证故障穿越策略的有效性,基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建光伏经双极MMC-HVDC的两端功率传输模型。模型中光伏电站额定容量为1 300 MVA,送端和受端换流站分别由两个额定容量为650 MVA的MMC串联而成,光伏电站出口电压为180 kV,送端换流站连接电网电压为230 kV。

模型的各参数见表1。仿真模拟光伏阵列在光照强度 S 为1 000 W/m²,温度 T 为25℃的标准测试环境条件下,双极MMC-HVDC在 $t=3$ s时发生正极接地短路,正极DCCB在6 ms内切断故障线路,并向系统发送故障信号,然后采取本文提出的故障穿越控制,在 $t=3.26$ s时故障成功清除,重合闸成功情况下系统的运行情况。

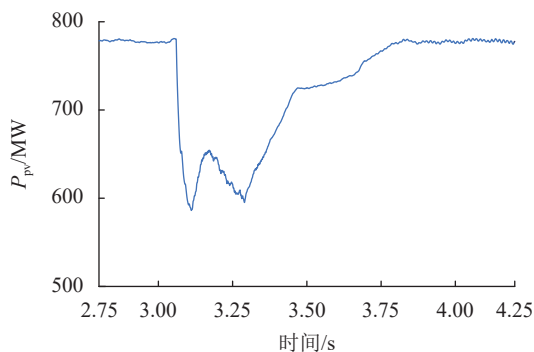
表 1 系统参数

Tab. 1 Sample of tablesSystem Parameters	
参数	数值
光伏阵列出口处额定直流电压/kV	75
额定交流电压/kV	230
架空线路额定直流电压/kV	320
桥臂子模块数量	38
子模块电容/mF	5.1
桥臂电抗器/mH	10
架空线路长度/km	400

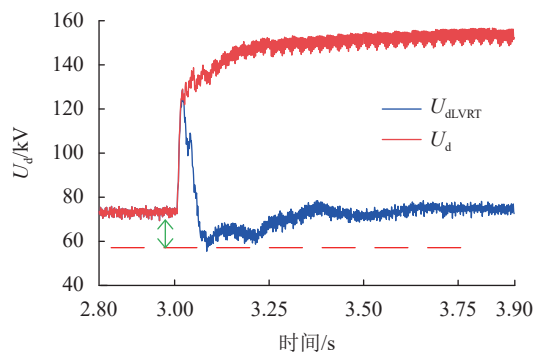
为充分验证光伏减载同MMC-HVDC协调故障穿越的可行性,使光伏电站输出功率为800 MVA,双极MMC-HVDC的两极换流站各输送400 MVA。从正、负极MMC有功功率 P_{GMMC1} 、 P_{GMMC2} ,负极MMC无功功率 Q_{GMMC2} 及负端子模块电压 V_c ,桥臂电流 I_T ,交流电压 u_g ,直流电压 U_d ,光伏阵列输出功率 P_{pv} 这8个仿真结果来展示故障时系统的故障穿越情况。

在直流架空线路发生正极短路接地时,经故障穿越措施调节后的 P_{pv} 和 U_d 变化仿真结果如图12所示。由图12(a)可见:3.00 s之前, P_{pv} 稳定输出780 MW的能量;在3.06 s时,DCCB动作,光伏MPPT控制环节增加减载控制,并在0.04 s内, P_{pv} 减小到最小值590 MW,且在故障穿越期间维持在650 MW以下;在3.26 s时,故障结束且DCCB重合闸成功后, P_{pv} 逐步恢复到780

MW的功率输出。



(a) P_{pv} 的变化



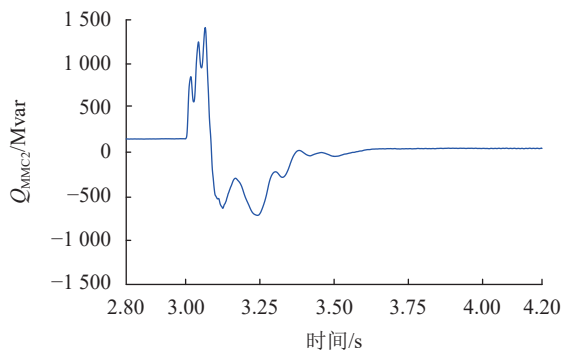
(b) U_d 的变化

图 12 光伏阵列出口 U_d 、 P_{pv}

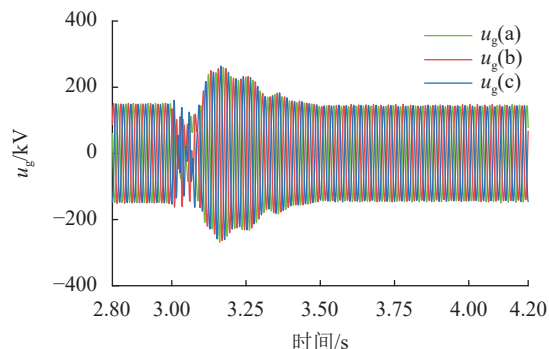
Fig. 12 U_d and P_{pv} at the outlet of PV array

由图12(b)可知:在未施加故障穿越措施时,由于冗余功率 U_d 快速上升至150 kV附近,直流电压越限严重,光伏电站难以正常运行;在3.06 s时,故障穿越措施加入后,在故障穿越期间 U_{dLVRT} 迅速下降至58 kV,其中,穿越前稳定的直流电压与穿越期间的直流电压之间的差值为 ΔU_d ,即可减少相应冗余功率 ΔP_d 对应的直流电压量。

在光伏电站进行减载的同时,MMC-HVDC的受端负极换流器向光伏电站出口处输出无功功率 Q_{MMC2} 的情况如图13(a)所示。如图13(a)可见:3.00 s前,从光伏电站吸收150 Mvar无功功率;3.00至3.06 s故障发生初期无功吸收不断增加;在接收到DCCB的故障信号后,3.06 s时, Q_{MMC2} 快速转换为向光伏电站出口输出200 Mvar无功功率,为 u_g 提供无功支撑。无功支撑效果如图13(b)所示,其中, $u_g(a)$ 、 $u_g(b)$ 、 $u_g(c)$ 分别为 u_g 的A、B、C三相电压。由图13(b)可见:在故障发生初期,即3.00到3.06 s时, u_g 幅值严重跌落,谐波大量增加;在3.06 s时,收到故障穿越信号,同时对光伏电站与MMC-HVDC连接点的无功功率注入增加。故障穿越期间电压谐波被深度抑制,电压在越限程度上上升;保证光伏电站不会发生因电压跌落造成的脱网,维持系统功率传输稳定。



(a) 无功输送



(b) 电压

图 13 光伏电站出口侧 u_g 与非故障极 Q_{MMC2} 变化趋势

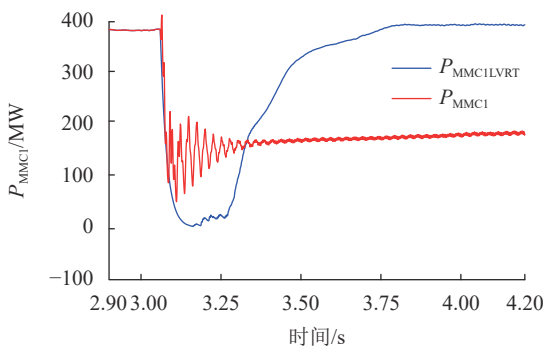
Fig. 13 Change trend of u_g at outlet side of photovoltaic power station and non-fault pole Q_{MMC2}

故障穿越控制施加前后MMC-HVDC正极MMC有功功率 P_{MMC1} 变化如图14(a)所示。由图14(a)可见:在增加故障穿越控制后,由于DCCB动作及MMC闭锁降低为0;在3.06 s故障隔离结束后, $P_{MMC1LVRT}$ 稳定恢复至正常功率传输。

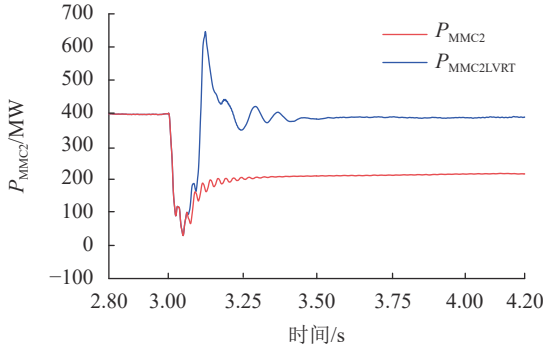
故障穿越控制施加前后,负极MMC传输的功率 P_{MMC2} 变化如图14(b)所示。由图14(b)可见:未加穿越措施时的 P_{MMC2} 在故障发生时系统失稳,不能在故障结束后恢复至正常功率输出;施加穿越措施 $P_{MMC2LVRT}$ 在3.06 s后, u_g 收到无功支撑,电压上升后,恢复功率输送稳定, $P_{MMC2LVRT}$ 开始快速增加传输功率至额定功率,故障隔离后恢复至正常功率传输。

故障时,正极MMC子模块电压 V_C 如图14(c)所示。由图14(c)可见,3.06 s穿越措施加入后, V_{CLVRT} 的幅值减小,并且在架空线路传输有功 P_{MMC2L} 增加后, V_{CLVRT} 始终保持在允许范围内。

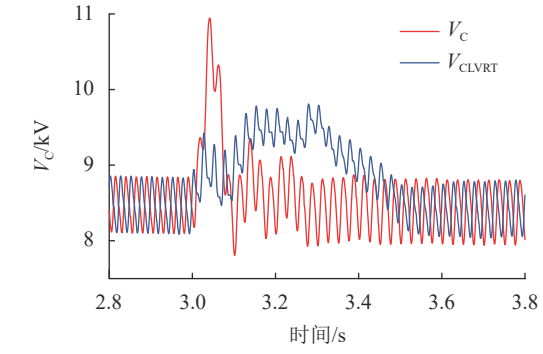
未加故障穿越策略时,负极MMC的桥臂电流 I_T 如图14(d)所示,其中, $I_T(1)$ 、 $I_T(2)$ 、 $I_T(3)$ 分别为三相桥臂电流值。由图14(d)可见,在故障穿越策略施加后,三相桥臂电流 I_{TLVRT} 不会出现冲击电流越限,保护了电子器件,且运行时电流波动小,减少了系统中谐波含量。



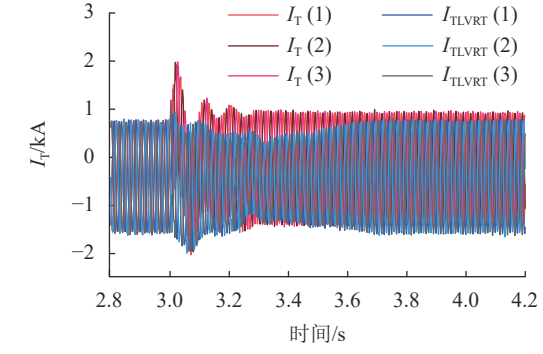
(a) 故障极换流站 P_{MMC1}



(b) 非故障极换流站 P_{MMC2}



(c) 非故障极子模块 V_C



(d) 非故障极桥臂 I_T

图 14 换流站有功功率故障穿越对比与非故障极子模块电压和桥臂电流

Fig. 14 Comparison of active power fault ride-through in converter station and non-faulty pole sub-module voltage and bridge arm current

4 结 论

本文针对光伏电站连接双极MMC–HVDC系统发生单极直流接地短路故障,在DCCB隔离直流故障基础上,提出1种直流故障穿越策略,得到以下结论:

1)在直流短路故障发生时,采用光伏电站减载控制,利用光伏发电自身特性减小输出功率,使非故障极换流器以额定功率运行消纳不平衡功率,降低了故障穿越成本,使系统运行安全。

2)在故障穿越期间MMC子模块电压控制在0.8~1.2标么值范围内,增强直流架空线路电压稳定性;在故障穿越控制施加后,有效防止了MMC桥臂电流快速上升越限,为功率传输系统安全提供了保护。

3)直流短路故障发生时,故障穿越策略增加MMC向并网点的无功支撑,降低并网点电压的跌落程度;减小直流线路上的功率传输,直流电压稳定性增强。

本文为大规模光伏经MMC–HVDC并网提供了技术支撑,后续将进一步研究光储联合系统经多端柔性直流输电系统并网的协调控制及直流故障穿越策略。

参考文献:

[1] Li Bo,Chen Minyou,Zhong Haiwang,et al.A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J/OL].Chinese Journal of Electrical Engineering[2022–04–20].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>. [黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J/OL].中国电机工程学报[2022–04–20].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>.]

[2] Tan Haiwang,Yang Qiliang,Xing Jianchun,et al.Photovoltaic power prediction based on combined XGboost-LSTM model[J].Acta Energiæ Solaris Sinica,2022,43(8):75–81. [谭海旺,杨启亮,邢建春,等.基于XGBoost-LSTM组合模型的光伏发电功率预测[J].太阳能学报,2022,43(8):75–81.]

[3] Yao Jinnan.National energy administration:In 2021,China’s new installed capacity of “Fengfeng” will exceed 100 million kilowatts[N].China Energy News,2022–02–07(001). [姚金楠.国家能源局:2021年我国新增“风光”装机破亿千瓦[N].中国能源报,2022–02–07(001).]

[4] Chen Wei,Ai Xin,Wu Tao,et al.Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J].Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):26–32. [陈伟,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26–32.]

[5] Ding Ming,Wang Weisheng,Wang Xiuli,et al.A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J].Chinese Journal of Electrical Engineering,2014,34(1):1–14.

- [丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].*中国电机工程学报*,2014,34(1):1-14.]
- [6] Lu Junjie,Cai Tao,Lang Jianxun,et al.Short-term power output forecasting of clustered photovoltaic solar plants based on cluster partition[J].*High Voltage Engineering*,2022,48(5):1943-1951.[卢俊杰,蔡涛,郎建勋,等.基于集群划分的光伏电站集群发电功率短期预测方法[J].*高电压技术*,2022,48(5):1943-1951.]
- [7] Tang Guangfu,Luo Xiang,Wei Xiaoguang.Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J].*Chinese Journal of Electrical Engineering*,2013,33(10):8-17.[汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].*中国电机工程学报*,2013,33(10):8-17.]
- [8] Xu Zheng,Xue Yinglin,Zhang Zheren.VSC-HVDC technology suitable for bulk power overheadline transmission[J].*Chinese Journal of Electrical Engineering*,2014,34(29):5051-5062.[徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].*中国电机工程学报*,2014,34(29):5051-5062.]
- [9] Tang Xiaojun,Han Minxiao,Huo Qidi,et al.Selection of VSC-HVDC application type matching requirements of different scenarios[J].*Automation of Electric Power Systems*,2019,43(16):183-191.[唐晓骏,韩民晓,霍启迪,等.匹配不同场景需求的柔性直流应用型式选择[J].*电力系统自动化*,2019,43(16):183-191.]
- [10] Wang Yuhong,Fu Yuntao,Zeng Qi,et al.Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids[J].*High Voltage Engineering*,2019,45(8):2362-2374.[王渝红,傅云涛,曾琦,等.柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J].*高电压技术*,2019,45(8):2362-2374.]
- [11] Wu Chengjie,Fu Chao,Fan Shixiong.Control strategy of low voltage ride-through for grid-connected PV system based on modular multilevel converter[J].*Electric Power Construction*,2018,39(7):48-56.[武承杰,付超,范士雄.基于模块化多电平换流器的光伏并网系统低电压穿越技术控制策略[J].*电力建设*,2018,39(7):48-56.]
- [12] Benhalima S,Tidjani F S,Benadja M,et al.Modified unified control of VSC-HVDC based offshore wind farm connected to onshore LargeScale photovoltaic power station[C]//*Proceedings of the 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*.Rabat:IEEE,1-6.
- [13] Gao Haili.Co-ordinated LVRT strategy for A single-terminal VSC-HVDC line connected photovoltaic power station[D].Nanning:Guangxi University,2018.[高海力.光伏电站单端柔直并网LVRT源网协调机制研究[D].南宁:广西大学,2018.]
- [14] Wang Yuhong,Lu Guoyi.Photovoltaic power station by VSC-HVDC grid-connected LVRT design[J].*Manufacturing Automation*,2020,42(12):125-130.[王雨虹,卢国义.基于VSC-HVDC光伏电站低压穿越策略[J].*制造业自动化*,2020,42(12):125-130.]
- [15] Zhu Huijun.Interaction fault analysis and coordinated protection of AC/DC side faults in the converter station in photovoltaic DC grid-connected system[D].Beijing:North China Electric Power University,2019.[朱惠君.光伏直流并网换流站交直流侧故障的交互影响分析及协调保护[D].北京:华北电力大学,2019.]
- [16] Xiao Peng.Research on the control strategy of large-scale photovoltaic power plants connected to the AC system via VSC-HVDC[D].Kunming:Kunming University of Technology,2021.[石肖鹏.大规模光伏电站经VSC-HVDC接入交流系统的控制策略研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.]
- [17] 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].*Chinese Journal of Electrical Engineering*,2020,40(11):3516-3527.[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.]
- [18] Xu Kehan,Zhang Zhe,Liu Huiyuan,et al.Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J].*Transactions of China Electrotechnical Society*,2020,35(2):359-371.[徐可寒,张哲,刘慧媛,等.光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J].*电工技术学报*,2020,35(2):359-371.]
- [19] Zhang Mingguang,Chen Xiaojing.A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J].*Power System Protection and Control*,2014,42(11):28-33.[张明光,陈晓婧.光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J].*电力系统保护与控制*,2014,42(11):28-33.]
- [20] Sun Yinfeng,Lu Yuze,Liu Yuhuan,et al.Coordinated control strategy of DC fault ride-through for flexible DC grid-connected system of wind power based on energy storage[J/OL].*Automation of Electric Power Systems*[2022-07-25].<http://doi.org/10.7500/AEPS20210816004>.[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/OL].*电力系统自动化*[2022-07-25].<http://doi.org/10.7500/AEPS20210816004>]
- [21] Zhang Zhengfa.Studies of MMC-HVDC control strategy[D].Jinan:Shandong University,2017.[张正发.MMC-HVDC控制策略研究[D].济南:山东大学,2017.]
- [22] Zhang Haolin.Research on reactive power and voltage coordination control in AC side of MMC-HVDC system[D].Beijing:North China Electric Power University,2021.[张豪林.MMC-HVDC系统交流侧无功电压协调控制研究[D].北京:华北电力大学,2021.]
- [23] Wang Fan,Liu Yimin,Yang Huimin,et al.The modeling of VSC-HVDC feed into the AC grid and the grid fault analysis[J].*Control Engineering of China*,2020,27(7):1293-1298.[王帆,

刘一民,杨慧敏,等.柔性直流输电并网建模及故障分析[J].[控制工程](#),2020,27(7):1293–1298.]

[24] Guo Xiaoqian,Cui Xiang,Qi Lei.DC short-circuit fault analysis and protection for heoverhead line bipolar MMC–HVDC system[J].[Chinese Journal of Electrical Engineering](#), 2017,37(8):2177–2185.[郭晓茜,崔翔,齐磊.架空线双极 MMC–HVDC系统直流短路故障分析和保护[J].[中国电机工程学报](#),2017,37(8):2177–2185.]

[25] Zeng Xinhui,Tan Jiancheng.Fault analysis and protection of VSC–HVDC line[J].[Zhejiang Electric Power](#),2019,38(6): 21–28.[曾鑫辉,谭建成.柔性直流输电线路故障分析与保护综述[J].[浙江电力](#),2019,38(6):21–28.]

[26] Wei Chengzhi,Liu Xingwei,Chen Xiaolong,et al.Modeling and simulation of photovoltaic power system with low voltage ride through capability[J].[Proceedings of the CSU–EPSA](#),2016,28(10):67–73.[魏承志,刘幸蔚,陈晓龙,等.具有低电压穿越能力的光伏发电系统仿真建模[J].[电力系统及其自动化学报](#),2016,28(10):67–73.]

[27] Yan Xiangwu,Zhao Jiale.LVRT strategy of grid-connected-photovoltaic system with variable power pointtracking[J].[Electric Power Automation Equipment](#),2017,37(8):214–219.[颜湘武,赵佳乐.变功率跟踪轨迹的光伏并网低电压穿越策略[J].[电力自动化设备](#),2017,37(8):214–219.]

[28] Ai Xin,Han Xiaonan,Sun Yingyun.Grid-connection characteristics of large-scale photovoltaic power station and its low-carbon operation and control technology[J].[Power System Technology](#),2013,37(1):15–23.[艾欣,韩晓男,孙英云.大型光伏电站并网特性及其低碳运行与控制技术[J].[电网技术](#),2013,37(1):15–23.]

[29] Wang Shuzheng,Yao Xiaojun,Zhao Jianfeng.A novel low voltage ride through strategy of two-stage grid-connected photovoltaic inverter[C]//[Proceedings of the 2013 1st International Future Energy Electronics Conference \(IFEEC\)](#). Tainan:IEEE,400–405.

(编辑 张凌之)

引用格式: Sun Yinfeng,Li Rong,Liu Jinxin,et al.Fault traversal strategy for large-scale photovoltaic power station via flexible DC grid-connected system[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2023,55(2):107–116.[孙银锋,李溶,刘金鑫,等.大规模光伏电站经柔性直流并网系统故障穿越策略[J].[工程科学与技术](#),2023,55(2):107–116.]