

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.014

# 基于电池储能的陆上风电全直流系统低电压穿越策略

曹勋哲, 李凤婷, 尹纯亚, 刘江山

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 陆上风电全直流系统能有效解决谐波谐振、无功传输等问题, 是未来风力发电系统的发展方向, 其低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力是系统稳定运行的保障。文中基于系统拓扑及其运行控制策略, 剖析网侧电压跌落时聚集在陆上风电全直流发电系统直流环节的盈余功率, 分析常规 LVRT 策略在风电全直流系统中的适用性。考虑电网对风电系统储能配置的要求, 兼顾风电机组自启动特性提出利用电池储能存储低电压故障下直流母线的盈余功率实现 LVRT 的控制策略。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建陆上风电全直流发电系统模型, 对所提策略进行仿真验证。结果表明, 所提控制策略能够提升风电全直流发电系统的 LVRT 能力, 促进直流母线电压的快速恢复; 电池储能在故障期间吸收盈余能量, 在风电机组自启动期间提供能量, 提高了能量与储能的利用率。

**关键词:** 陆上风电全直流发电系统; 故障特性; 低电压穿越(LVRT); 自启动; 电池储能; 直流母线电压恢复

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)03-0150-10

## 0 引言

风电全直流发电系统可有效解决诸多交流汇集和送出存在的问题, 提高发电效率, 降低发电成本<sup>[1-3]</sup>。当电网受到大扰动发生电压跌落时, 全直流发电系统中直流母线集聚过多能量, 对系统中电力电子器件产生严重的影响。因此, 明确陆上风电全直流发电系统的低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)机理, 提出适用于陆上风电全直流发电系统的 LVRT 策略有助于保障系统稳定运行, 促进陆上风电全直流接入技术的发展。

当前提出的 LVRT 技术可分为变流器控制策略改进<sup>[4-11]</sup>和增加外部设备<sup>[12-15]</sup>2种方法。文献[11]提出一种新型虚拟同步机的控制策略, 可有效改善不对称电压跌落情况下系统稳定性; 文献[13]提出基于 Crowbar 串联电容的风电系统 LVRT 综合控制策略, 以提高风电系统运行稳定性。也有专家提出将2种方法结合以实现风电系统 LVRT, 文献[16]提出基于变阻值卸荷电路和变功率因数无功控制的直驱风电机组 LVRT 综合策略。以上研究主要针对以交流方式接入的风力发电系统。

针对直流型风力发电系统 LVRT 的研究集中于海上风力发电系统<sup>[17-22]</sup>。文献[21]对传统双有源桥式(dual active bridge, DAB)变换器结构进行改进, 增设故障电流阻断模块和补偿电容支路, 能有效改善低电压侧电压跌落; 文献[22]提出一种基于

级联型电力电子变压器输入级与隔离级协同配合的无闭锁故障穿越方案。

陆上风电全直流发电系统作为一种新型全直流汇集送出系统, 可以为直流负荷较多的孤网和源网荷储园区直接供电, 也能更好地为西电东送提供支撑、减少成本与提高效率。目前陆上风电全直流系统处于研究及示范应用阶段, 其拓扑、风机类型、关键电气元件的运行控制技术有其特殊性。应用于常规风电系统故障穿越技术的关键点在于风机感知到故障后及时采取控制措施释放盈余能量。但陆上风电全直流发电系统在电网电压跌落时, 升压变换器会通过电气隔离将故障隔绝, 虽可保证正常输出功率, 但阻断了风机对故障的感知, 无法启动 LVRT 控制策略。同时电压跌落时直流环节集聚的盈余能量远高于常规风电系统, 因此, 常规 LVRT 策略在风电全直流发电系统中适用性较差。

文中根据陆上风电全直流发电系统的全新拓扑及控制策略, 分析全直流发电系统故障特性的特殊性, 考虑各地方新建风电装机配套储能政策的要求, 即储能配置比例基本不低于 10%, 以提升风电全直流发电系统的 LVRT 能力为目标, 结合系统跟网运行特性提出一种基于电池储能系统的控制策略, 并与常规 LVRT 策略进行对比, 仿真验证文中策略的优越性。文中所提考虑陆上风电全直流系统运行特性和故障特性的 LVRT 策略能为该系统未来的发展及应用提供理论与技术支撑。

## 1 陆上风电全直流发电系统

### 1.1 风电全直流发电系统拓扑

陆上风电全直流发电系统作为一种新型全直

收稿日期: 2024-08-19; 修回日期: 2024-10-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“陆上风电场群全直流发电系统及协同控制技术”(2021YFB1507001)

流汇集送出系统, 目前暂无固定拓扑, 文中以图 1 所示拓扑为例展开研究。直流型风机包括永磁直驱同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)、机侧变流器和直流升压变换器。其中机侧变流器采用电压源变流器(voltage source converter, VSC), 控制 PMSG 的输出功率, 保证 PMSG 的稳定运行; DC/DC 升压变换器采用 DAB 变换器, 用于稳定 PMSG 通过 VSC 输出的直流电压并实现电气隔离。而网侧变流器选取模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC), 保证直流母线电压稳定, 同时对输入电网的有功与无功进行控制, 实现能量双向流动, 保证将风电场输出的功率输送至网侧公共连接点(point of common coupling, PCC)。

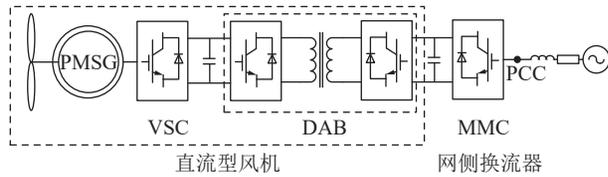


图 1 陆上风电全直流发电系统拓扑

Fig.1 Topology of all-DC power generation system of onshore wind power

风电全直流系统直流升压变换环节采用 DAB 变换器, 变换器由 2 个全桥电路和高压变压器构成, 如图 2 所示。图 2 中,  $U_1$ 、 $U_2$  分别为变压器 T 两侧的直流电压;  $n$  为变压器变比; 开关管  $Q_1$ — $Q_4$  组成变压器一次侧的  $H_1$  桥,  $Q_5$ — $Q_8$  组成变压器二次侧的  $H_2$  桥;  $C_1$  为  $H_1$  桥缓冲电容;  $C_2$  为  $H_2$  桥支撑电容;  $L$  为变压器漏感, 其值为所有漏感的总和;  $i_{in}$ 、 $i_{out}$  分别为 VSC、DAB 变换器的输出电流;  $i_1$ 、 $i_2$  分别为  $H_1$  桥输入电流和  $H_2$  桥输出电流。

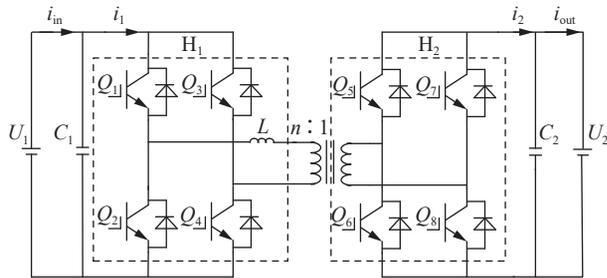


图 2 DAB 变换器结构

Fig.2 Structure of DAB converter

高频变压器具备电气隔离、能量双向传递的功能。根据风电全直流发电系统跟网运行特性, 在需要直流型风机启动时, 由电网侧向风机侧提供自启动所需的能量; 在直流型风机正常运行后, 风机侧向电网侧传输功率, 为电网侧提供能量, DAB 变换器作为核心设备可以更好地促进系统能量的传输。

## 1.2 风电全直流发电系统运行控制策略

### 1.2.1 机侧 VSC 控制策略

机侧 VSC 采用转速外环、电流内环控制策略。发电系统在变功率输出阶段时, 发电机转速指令由机组控制器给定, VSC 负责控制发电机跟踪给定转速, 控制框图如图 3 所示。图 3 中,  $\omega_s$  为同步转速;  $\omega_{sref}$  为同步转速基准值;  $\omega_r$  为发电机转速;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  分别为定子绕组  $d$ 、 $q$  轴电流;  $i_{sdref}$ 、 $i_{sqref}$  分别为定子绕组  $d$ 、 $q$  轴电流基准值;  $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$  分别为定子绕组  $d$ 、 $q$  轴电感;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压;  $u_{sdref}$ 、 $u_{sqref}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压基准值;  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  轴电压;  $\psi_f$  为转子磁链;  $\theta_r$  为偏离绕组轴线的电角度;  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$  为三相定子电流; PI 为比例积分调节器; SVPWM 为空间矢量脉宽调制。

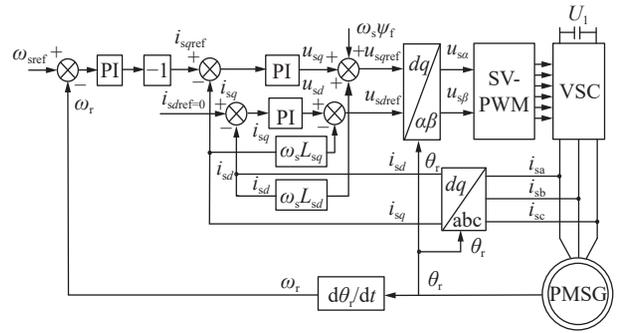


图 3 机侧 AC/DC 变流器控制策略

Fig.3 Control strategy of AC/DC converter on machine side

控制系统转速外环通过转速的给定值与实际转速之间的差值经过 PI 调节器输出有功电流的基准值  $i_{sqref}$ , 通过电流内环控制, 将机械功率转换为电磁功率。

### 1.2.2 升压 DAB 变换器控制策略

DAB 变换器采用输出侧稳压控制策略, 控制框图如图 4 所示。图 4 中,  $d$  为控制环输出移相比;  $\varphi$  为移相角;  $S$  为开关信号; PWM 为脉宽调制;  $u_1$ 、 $u_{1ref}$  分别为 DAB 变换器电压的输入值和参考值。

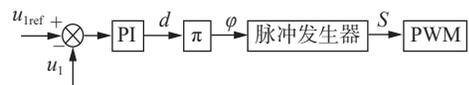


图 4 DAB 变换器控制策略

Fig.4 Control strategy of DAB converter

电压环控制的状态方程和控制环输出移相比  $d$  可表示为:

$$\begin{cases} \frac{df_u}{dt} = u_{1ref} - u_1 \\ d = k_p(u_{1ref} - u_1) + k_i f_u \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k_p$ 、 $k_i$  分别为 PI 控制比例系数和积分系数;

$f_u$  为与电压  $u_1$  有关的函数。

将理想变压器原副边全桥开关控制信号错开一个相位,可在电感  $L$  两侧得到相位不同的电压方波,两侧电压方波的相位差决定了能量传输的方向和大小,稳压控制通过 PI 控制器稳定 DAB 变换器的输出电压。

### 1.2.3 网侧 MMC 控制策略

网侧 MMC 控制系统包括稳压控制、锁相环 (phase locked loop, PLL) 控制和环流抑制控制,控制框图如图 5 所示。图 5 中,  $u_2$  为 MMC 直流侧电压;  $u_{2ref}$  为 MMC 直流侧电压基准值;  $\omega_0$  为电网电压额定角频率;  $L_{eq}$  为等效电感;  $m_{1d}$ 、 $m_{1q}$  分别为参考信号调制比  $d$ 、 $q$  轴基频分量;  $\theta$  为锁相环的电压矢量角度;  $i_{cir d}$ 、 $i_{cir q}$  分别为 MMC 内部环流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{cir dref}$ 、 $i_{cir qref}$  分别为 MMC 内部环流  $d$ 、 $q$  轴分量基准值;  $L_{arm}$  为桥臂电感;  $m_{2d}$ 、 $m_{2q}$  分别为环流抑制控制环节触发信号  $d$ 、 $q$  轴的二倍频分量;  $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$  分别为网侧电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$  分别为网侧电压  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{gdref}$ 、 $i_{gqref}$  分别为网侧电流  $d$ 、 $q$  轴分量基准值;  $u_{gdref}$ 、 $u_{gqref}$  分别为网侧电压  $d$ 、 $q$  轴分量基准值。

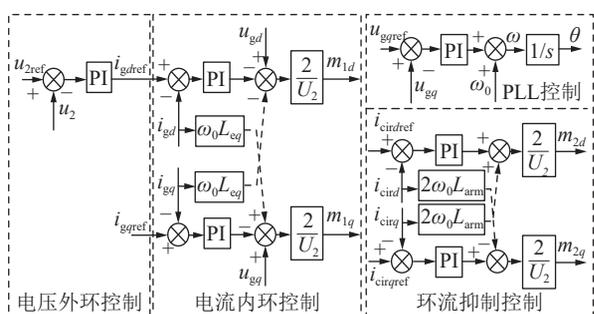


图 5 网侧 MMC 控制策略

Fig.5 MMC control strategy on grid side

MMC 的稳压控制通过电压外环、电流内环控制稳定直流母线电压。

## 2 电压跌落时风电全直流系统故障特性

从 DAB 变换器向 MMC 输送电能的过程中,直流母线上的电容起到能量缓冲,保护 DAB 变换器与 MMC 之间的能量传递,平复两侧能量波动的作用。在忽略损耗的情况下,直流发电系统外送能量数学模型为:

$$P_C = CU_C \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{2} C \frac{dU_C^2}{dt} = P_M - P_G \quad (2)$$

式中:  $P_C$  为输入直流侧电容的有功功率;  $U_C$  为直流侧电容两端的电压;  $P_M$  为直流母线输入的有功功率;  $P_G$  为直流母线输出的有功功率;  $C$  为机侧与网侧之间的电容值。

系统处于稳态且忽略损耗时,  $P_M = P_G$ , 即  $P_C = 0$ 。电网发生线路故障时,网侧 PCC 电压跌落,由于 DAB 变换器可以实现电气隔离,因此风机与 VSC 不受故障影响,从机侧输出的功率不变,为了维持机侧与网侧功率平衡,网侧 PCC 电流上升,而 MMC 限流控制限制电流升高,导致网侧 PCC 输出功率降低,  $P_G$  减小,直流母线两侧有功功率  $P_M > P_G$ , 产生多余能量,此时机侧电压  $U_M >$  网侧电压  $U_G$ , 能量从机侧流向网侧,多余能量堵塞在直流母线,导致直流母线上电容电压上升,超出电容调节能力,从而损坏直流母线上的电容与功率器件,甚至导致整个风电机组脱网。

## 3 常规风电系统 LVRT 策略分析

我国 LVRT 要求如下:风电场内的风电机组具有在并网点电压跌至 20% 额定电压时仍能够保持并网运行 625 ms 的 LVRT 能力;风电场并网点电压在发生跌落后 2 s 内能够恢复到额定电压的 90%,风电场内的风电机组保持稳定运行,如图 6 所示。

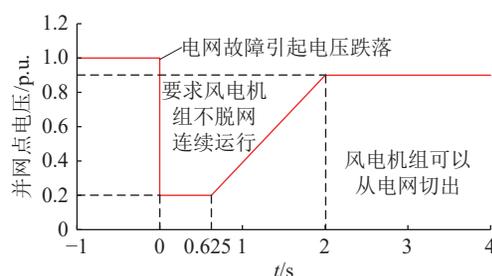


图 6 LVRT 要求

Fig.6 LVRT requirements

常规风电系统可以通过改进电力电子器件控制策略降低风机的输出功率,减少直流环节的盈余能量,再结合耗能电阻实现低电压故障穿越。因此,对于常规风电系统,发生低电压故障时,风机的输出功率降低为  $P'_M$ , 即:

$$P'_M = 0.65P_G \quad (3)$$

目前变流器限流幅值为 1.5 p.u., 结合故障最严重的电网电压跌落 80% 的情况,根据跌落前系统流过直流母线的功率恒定,MMC 并入电网功率保持不变,则故障发生后网侧有功功率  $P'_G$  为:

$$P'_G = 1.5i_g \times 0.2u_0 = 0.3P_G \quad (4)$$

式中:  $i_g$  为网侧电流;  $u_0$  为网侧电压。

此时,直流环节的功率差  $P_D$  为:

$$P_D = P'_M - P'_G = 0.35P_G \quad (5)$$

对于风电全直流系统,发生低电压故障时,直流感风机机侧输出有功功率  $P_M$  不变,因此机侧有功功率  $P_M$  与直流环节功率差  $P'_D$  分别为:

$$P_M = P_G > P'_G \quad (6)$$

$$P'_D = P_M - P'_G = 0.7P_G \quad (7)$$

分析可知,网侧 PCC 发生电压跌落时,风电全直流系统机侧与网侧产生的多余能量将导致直流母线上电容电压快速升高,超出电容承受电压能力,破坏电气设备与系统稳定性,致使风电全直流发电系统 LVRT 失败。因此,相较于常规风电系统,风电全直流系统在直流环节聚集更多能量,如图 7 所示。

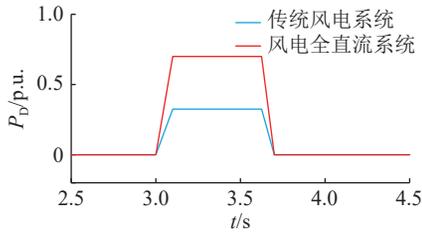


图 7 直流环节功率差对比

Fig.7 DC link power difference comparison

此时,为保证全直流风电系统实现 LVRT,必须采用有效技术方法及时消耗或吸收盈余能量。常规风电系统 LVRT 策略如下:

(1) 改进变换器控制策略。风电全直流系统可通过改进系统中变换器的控制策略实现 LVRT,控制框图如图 8 所示。图 8 中,  $i_L$  为等效电感电流;  $i_{Lref}$  为电感电流基准值;  $U_{in}$ 、 $U_{inref}$  分别为输入电压与其基准值;  $G_u(s)$ 、 $G_i(s)$  分别为电压、电流关于  $s$  的函数。通过输入电压与其基准值进行比较得到误差信号,再通过计算得到输入电感电流的基准值,基准值与电感电流实际值对比可得到开关信号,以此来完成 LVRT。

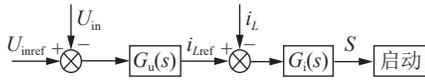


图 8 改进变换器控制策略

Fig.8 Improved converter control strategy

(2) 增加耗能式设备。增加耗能式设备是目前运用较为广泛的 LVRT 策略之一,直接将网侧与机侧盈余的电能通过耗能电阻以其他能量形式消耗,图 9 为耗能式 LVRT 拓扑。图中  $L_1$  为线路电感;  $R$  为耗能设备电阻。

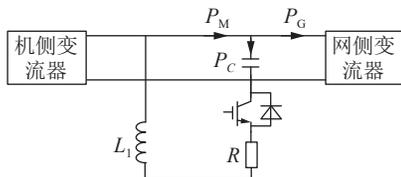


图 9 耗能式 LVRT 拓扑

Fig.9 Topology of energy-consuming LVRT

电网发生低电压故障后,当直流侧母线电压超过规定值时,电力电子器件开通,将耗能电阻接入全直流风电系统直流侧,构成耗能回路,消耗多余有功;电网恢复正常工作状态后,电力电子器件关断,耗能单元停止工作,直流侧电压保持在正常工作范围内。其中,耗能电阻  $R$  的大小根据直流侧承受最大电压  $u_{dcmax}$  以及机侧与网侧的功率之差求得。

$$R = \frac{u_{dcmax}^2}{P_C} \quad (8)$$

## 4 基于电池储能的 LVRT 控制策略

分析常规风电系统 LVRT 策略,为提高陆上风电全直流发电系统的 LVRT 能力,解决直流型风机自启动问题,文中计及陆上风电全直流发电系统 LVRT 机理与系统跟网运行特性,结合国家对风电配置储能的要求,提出一种基于电池储能的 LVRT 控制策略。在满足风电配置储能的要求下,提高陆上风电全直流发电系统 LVRT 能力,同时为系统自启动提供辅助支撑并且维持系统稳定运行。

### 4.1 储能容量选择

选择储能容量时,既要满足风力发电系统 LVRT 能力的要求,也要考虑到对风力发电机自启动时的辅助支撑。在电网发生故障时,由于机侧、网侧的功率传输不平衡,多余的能量将存储在储能系统中。分析系统可知,储能存储的能量可表示为:

$$E_{LVRT} = \int_0^t (P_M - P_G) dt = (P_M - P_G)t \quad (9)$$

式中:  $E_{LVRT}$  为储能在电网故障期间吸收的能量;  $t$  为  $P_M = P_G$  所需的时间。

考虑到低电压故障严重程度以及风力发电系统中直流型风力发电机自启动的要求,储能系统需要存储的能量  $E_s$  为:

$$E_s = E_0 + (P_{M,max} - P_{G,LVRT})t \quad (10)$$

式中:  $E_0$  为储能初始存储的电能;  $P_{M,max}$  为直流型风机最大输出有功功率;  $P_{G,LVRT}$  为发生低电压故障时网侧输入有功功率;  $t$  取 LVRT 要求时间,即 2 s。

电池的荷电状态(state of charge, SOC)作为衡量电池充放电状态的工作参数,是电池电量的直接反映,其值为电池剩余容量与完全充满电状态容量的比值,常用百分数表示。

$$S_{SOC} = \frac{E_t}{E} = 1 - \frac{\int I dt}{Q} \quad (11)$$

$$S_{SOC,t} = S_{SOC,0} + \Delta S_{SOC} \quad (12)$$

式中:  $S_{SOC}$  为电池荷电状态;  $E_t$  为  $t$  时刻电池储存的能量;  $E$  为电池储能的额定容量;  $S_{SOC,t}$  为  $t$  时刻的荷

电状态;  $S_{SOC,0}$  为电池储能系统运行时的初始荷电状态;  $S_{\Delta SOC}$  为系统运行中荷电状态变化量;  $I$  为输出电流;  $Q$  为导体横截面通过的电荷量。

当  $S_{SOC}=0$  时, 电池完全放电; 当  $S_{SOC}=1$  时, 电池完全充满。在电池储能系统的实际运行中,  $S_{SOC}$  值应稳定在 0~1 之间, 否则会使电池过充或过放, 影响电池的使用寿命。根据电池储能充放电深度, 设定  $S_{SOC}$  为 0.8, 作为储能电池初始储存能量, 在需要时为风电全直流系统中直流型风机自启动提供能量。

### 4.2 储能系统的控制策略

根据网侧发生电压跌落时风电全直流发电系统故障特性以及直流风机自启动需求, 考虑在风电全直流系统直流环节配置电池储能系统, 如图 10 所示, 其中  $L_{Li}$  为等效电感。

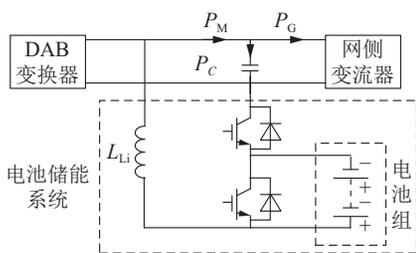


图 10 电池储能系统  
Fig.10 Battery energy storage system

储能系统通过半桥双向 DC/DC 变换器进行能量流动, 变换器采用双环串级控制, 内环为电感电流环, 外环为直流母线电压环。电流内环可以提高系统的响应速度, 使系统获得很好的动态性能以及抑制干扰的能力; 电压外环的作用是根据直流发电系统中直流环节的输出电压, 通过稳压控制维持电池储能系统输出直流电压稳定, 其控制框图如图 11 所示。图 11 中,  $u_{dc}$ 、 $u_{dref}$  分别为升压变换器输出电压及其参考值;  $i_{L1}$ 、 $i_{Lref1}$  分别为内环电流实际值和参考值;  $R_{Li}$ 、 $C_{Li}$  分别为电池储能系统的内阻和电容;  $G_{id}(s)$  为电流  $d$  轴关于  $s$  的函数。

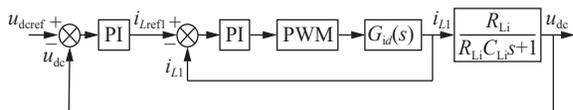


图 11 双向 DC/DC 变换器控制策略  
Fig.11 Control strategy of bidirectional DC/DC converters

分析图 11 可知, 外环电压环根据升压变换器输出电压  $u_{dc}$  与所设定参考输出电压  $u_{dref}$  比较得到误差信号, 经 PI 调节器得到内环电流的参考值  $i_{Lref1}$ 。内环电流实际值  $i_{L1}$  与  $i_{Lref1}$  作差, 得到误差信号经电流环 PI 调节与 PWM 产生开关信号, 从而控

制功率开关管的开通关断, 实现电池储能的功率双向流动, 提高电池的利用率。

电池储能系统的启停控制主要通过判断全直流发电系统机侧与网侧的功率差进行启停控制, 如图 12 所示。通过 DAB 变换器与 MMC 之间的功率差值与母线电压基准值  $u_{dref}$  得到直流母线的电流采样值  $i_{dc}$ , 将直流母线电流采样值与电流基准值  $i_{dref}$  比较得到误差信号, 经过 PI 调节器得到电池储能系统的开关信号。

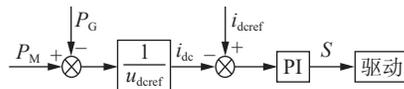


图 12 电池储能系统启停控制  
Fig.12 Start and stop control of battery energy storage system

风电全直流系统 LVRT 控制流程如图 13 所示。分析可知, 当直流母线两侧功率差值在系统允许的范围  $\delta$  内, 即  $|P_M - P_G| \leq \delta$  时, 变换器处于待工作状态, 电池储能系统不启动; 当直流母线两侧功率差超出  $\delta$  时, 若  $P_M < P_G$ , 电池储能处于正向升压 (Boost) 模式, 电池组向电网输出功率, 可以辅助风机实现快速自启动, 同时使直流母线电压升高至稳定状态; 若  $P_M > P_G$ , 电池储能处于反向降压 (Buck) 模式, 直流母线电压高于参考电压, 电流从直流母线流向储能系统, 将多余的能量输送至储能系统, 从而达到降压目的, 维持母线电压的稳定。

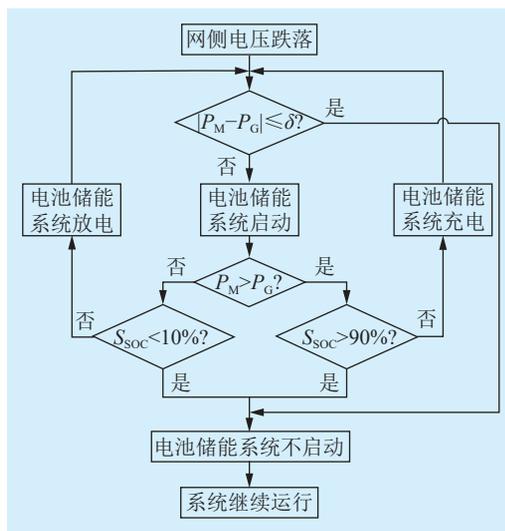


图 13 风电全直流发电系统 LVRT 控制流程  
Fig.13 Flow chart of LVRT control for wind power all-DC power generation system

此外, 需要直流型风机自启动时, 电网侧向风机提供能量, 同时储能向风机传送能量, 辅助直流型风机快速启动, 考虑到储能过放过充都会导致储能寿命下降, 甚至发生燃烧或爆炸, 造成严重后果,

监控电池组的 SOC 是储能系统控制的重要部分。根据对不同电池储能的分析与验证,采用电池储能的荷电状态  $S_{\text{soc}}$  作为截止判断条件<sup>[23-25]</sup>。当  $S_{\text{soc}} < 10\%$  时,切断电池储能系统,停止向电网继续供电;当  $S_{\text{soc}} > 90\%$  时,切断直流变换器,阻止直流母线向电池储能系统供电。

## 5 仿真验证

为验证文中所提 LVRT 方案的有效性和适用性,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建风电全直流发电系统仿真模型,对其 LVRT 特性以及直流型风机自启动场景进行仿真分析,并将所提策略与 2 种常规 LVRT 策略仿真结果进行对比分析。文中所采取的发电系统部分参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型主要参数

Table 1 Main parameters of the simulation model

参数	数值	参数	数值
风机直径/m	126	额定风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	10
系统额定功率/MW	5	最佳风能利用系数	0.495
极对数	49	自阻尼系数	0.002
定子等效电感/mH	12.8	定子等效电阻/ $\Omega$	0.001
电池储能容量/( $\text{MW}\cdot\text{h}$ )	5	电池初始储能容量/%	50
系统输出直流电压/kV	33	网侧线电压有效值/kV	35

### 5.1 低电压穿越场景及策略分析

网侧发生故障时,风电全直流系统中直流型风机输出波形如图 14 所示。

风机稳定输出的电压  $U_m$  始终保持在 1 p.u., 电压波形如图 14(a) 所示; 输出电流  $I_m$  同样始终保持在 1 p.u., 电流波形如图 14(b) 所示; 此时直流型风机按照最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)输出有功功率  $P_m$ , 如图 14(c) 所示; 同时,注入电网的无功功率  $Q_m$  始终为 0, 如图 14(d) 所示。根据波形分析可得, DAB 变换器可以实现电气隔离, 保证全直流发电系统中直流型风机在故障情况下可以稳定运行。

当电网受到大扰动影响, 特别是发生接地故障或短路故障时, 直流母线会产生较高过电压, 破坏系统的稳定运行, 导致直流型风机脱网。文中以发生概率最大的单相接地故障与故障程度最严重的三相短路故障为例, 对所提策略进行仿真验证。图 15、图 16 分别为发生单相接地故障与三相短路故障时网侧仿真结果, 设置  $t=3\text{ s}$  时, 网侧分别发生单相接地故障与三相短路故障, 持续时间为 0.625 s。

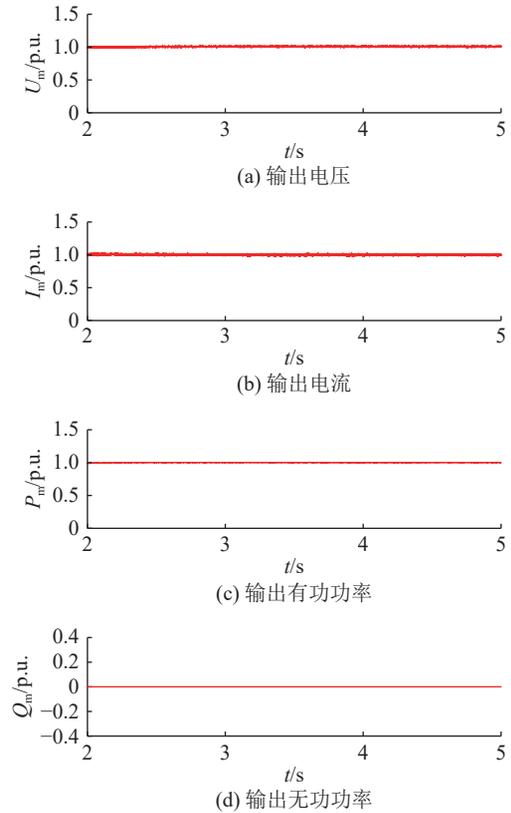
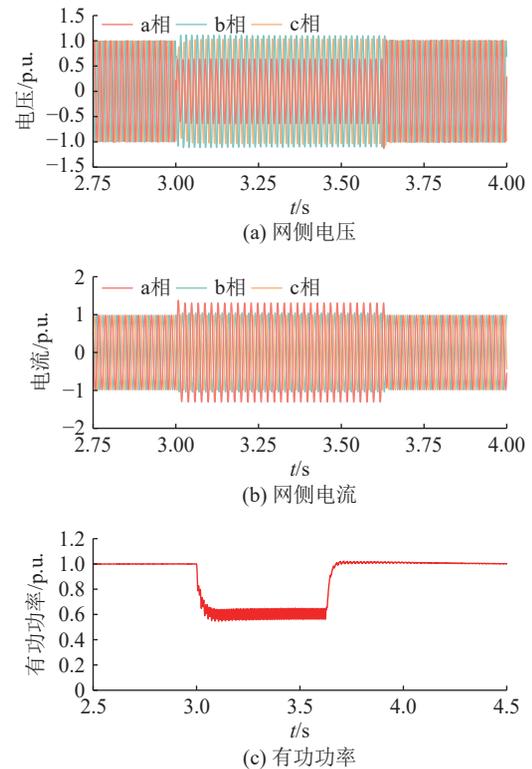


图 14 风电全直流发电系统输出波形

Fig. 14 Output waveforms of wind power all-DC power generation system

图 15(a) 为网侧发生单相接地故障时电压仿真结果, 故障相电压发生跌落; 图 15(b) 为接地故障时电流仿真结果, 故障相电流升高, 另外两相电流基本不发生变化; 结合电压与电流的变化, 网侧输出



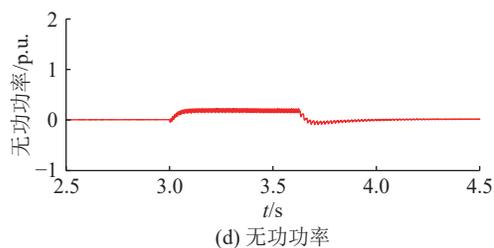
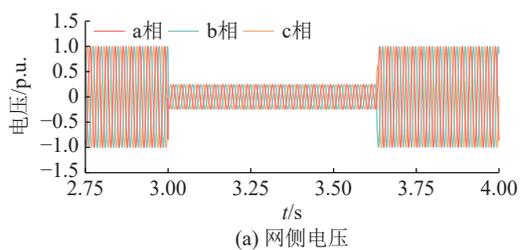
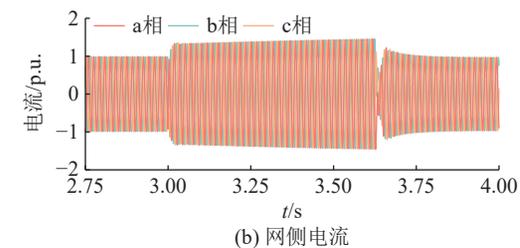


图 15 网侧发生单相接地故障仿真结果

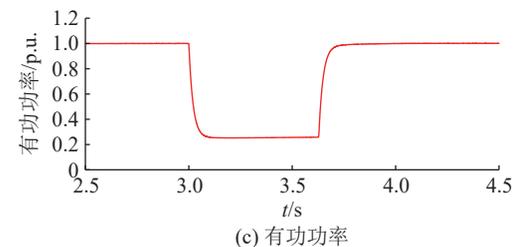
Fig.15 Simulation results of single-phase ground fault on the grid side



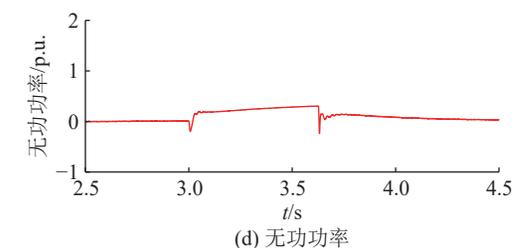
(a) 网侧电压



(b) 网侧电流



(c) 有功功率



(d) 无功功率

图 16 网侧发生三相短路故障仿真结果

Fig.16 Simulation results of three-phase short-circuit fault on the grid side

的有功功率在故障期间降低,如图 15(c)所示;此时,电网需要无功功率以支撑电网恢复,输出无功功率如图 15(d)所示。

图 16(a)为网侧故障时电压仿真结果,电压跌落至 0.2 p.u.;图 16(b)为网侧故障时电流仿真结果,由于全直流发电系统中 MMC 的控制策略,允许通过电流为额定电流的 1.5 倍,故发生故障时网侧电流最大值为 1.5 p.u.;由于网侧电压跌落,通过电流

最大值为 1.5 p.u.,网侧输出的有功功率在故障期间降低,如图 16(c)所示;此时,电网吸收无功功率以支撑电网恢复,MMC 输出无功功率如图 16(d)所示。

故障期间 MMC 的电流波形如图 17 所示,在 2 种故障期间,通过 MMC 的电流在控制策略作用下小幅上升后恢复至额定值。

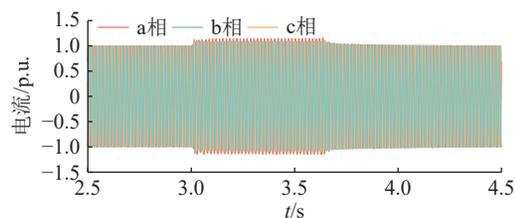


图 17 故障期间 MMC 电流仿真结果

Fig.17 Simulation results of MMC current during fault

故障期间电池储能系统的荷电状态变化如图 18 所示。故障发生后,电池储能系统启动, $S_{SOC}$  逐渐上升,在故障结束后维持不变。电池储能系统故障期间电流变化如图 19 所示,储能系统启动后,电流达到最大值,在控制策略的作用下逐渐恢复至额定值,在故障结束后,储能系统关闭,电流减小到 0。

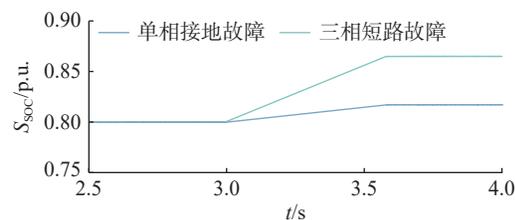


图 18 故障期间储能系统荷电状态

Fig.18 SOC of energy storage system during fault

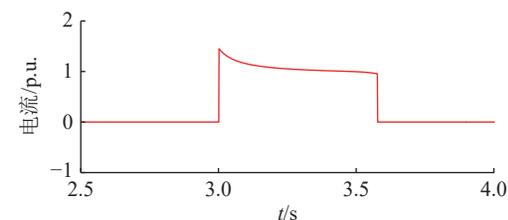


图 19 储能系统故障期间电流仿真结果

Fig.19 Simulation results of current during energy storage system failure

对文中提及的 2 种常规策略与新策略进行仿真分析,对比结果如图 20 所示。控制策略 1 为改进变换器控制的控制策略;控制策略 2 为增加耗能电阻的控制策略;控制策略 3 为基于电池储能系统的控制策略,即文中控制策略。

分析图 20(a)可知,网侧发生单相接地故障时,在改进变换器控制策略下直流环节电压小幅度上升后逐渐降低,在故障结束后,降低至 1 p.u.以下并在一定的时间内恢复至额定电压;在增加耗能电阻的控制策略下电压上升幅度和下降幅度均小于控

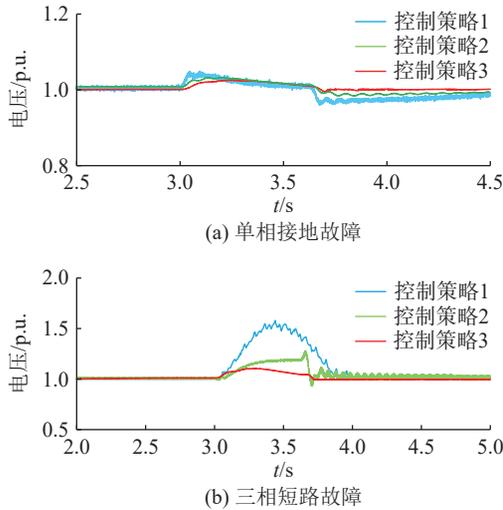


图 20 LVRT 策略仿真结果对比

Fig.20 Simulation results of LVRT strategy comparison

制策略 1, 电压波动较小, 对系统产生较小影响; 在文中控制策略下电压波动小于其他控制策略, 且在故障结束后很快恢复至额定电压。仿真结果显示, 3 种控制策略均可以在符合要求的情况下完成风电全直流系统 LVRT, 文中控制策略较常规控制策略能够更快地辅助系统恢复正常运行, 具有适配性。

分析图 20(b)可知, 系统在 3 s 发生故障时, 直流母线电压上升, 短时间内超过允许波动范围, 在改进的变换器控制策略作用下, 电压逐渐降低, 故障消除之后恢复至额定电压; 在增加耗能电阻的控制策略下, 多余能量通过耗能电阻转换为热能释放, 直流环节的直流电压降低, 故障结束后逐渐恢复至额定电压; 在文中控制策略下, 直流母线电压在故障期间波动范围小幅上升, 基本不影响系统正常运行, 电池储能系统在 0.625 s 内吸收多余能量, 系统快速恢复额定电压。相较另外 2 种常规控制策略, 文中控制策略能够使风电全直流发电系统更平稳地渡过故障时期, 快速恢复稳定运行。

## 5.2 直流型风机自启动场景及策略分析

在风电全直流发电系统启动时, 根据电池储能的启停控制, 配合电网为直流型风机提供能量, 直流型风机输出功率仿真结果如图 21 所示。分析图 21 可知, 在直流型风机未配置电池储能时, 风机启动能量全部来自电网, 仿真结果波动较大; 配置电池储能后, 从直流型风机启动至稳定输出功率所需时间较短, 此时直流型风机自启动能量由电池储能和电网一起提供, 并且在电池储能的辅助支撑下, 直流型风机输出功率更加平稳, 电池储能能够辅助陆上风电全直流发电系统稳定启动。

相较其他储能设备, 电池储能的自放电率小, 可以很好地存储盈余能量, 因此, 相较其他储能设

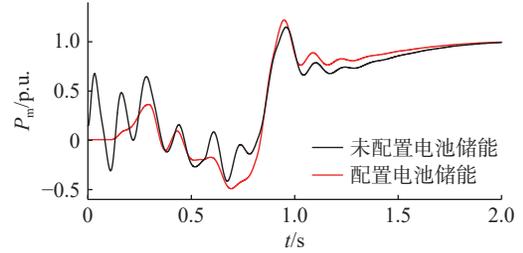


图 21 直流型风机自启动输出功率仿真结果对比

Fig.21 Comparison of self-starting output power simulation results of DC wind turbines

备参与 LVRT, 文中所提策略可将故障期间存储的盈余能量应用于直流型风机启动, 提高了能量的利用率。

对比分析常规风电系统 LVRT 策略与文中所提 LVRT 策略可知, 结合风电配置储能的要求与陆上风电全直流发电系统的跟网运行特性, 文中控制策略在 LVRT 效果与风机自启动方面更加适配系统, 在提高系统 LVRT 能力的同时为直流型风机自启动提供支撑, 具有一定的优越性。

## 6 结论

文中针对陆上风电全直流发电系统 LVRT, 提出一种基于电池储能的 LVRT 控制策略, 主要结论如下:

(1) 基于陆上风电全直流发电系统的新型拓扑与控制策略分析网侧发生电压跌落时全直流发电系统的故障特性, 其故障影响程度较传统风力发电系统更加严重。

(2) 根据风电全直流发电系统的故障特性及其跟网运行的特点, 结合风电配置储能的要求提出基于电池储能系统的控制策略作为陆上风电全直流发电系统 LVRT 策略并选择电池储能作为直流型风机自启动的备用设备。

(3) 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建仿真模型, 验证文中所提 LVRT 策略的可行性和优越性。该策略能够提升风电全直流发电系统的 LVRT 能力, 促进故障结束后系统快速实现稳定运行并且为直流型风机自启动提供辅助支撑。

未来需要进一步深入分析和研究陆上风电全直流发电系统在满足所提策略下稳定运行的同时如何保有经济性优势。

## 参考文献:

- [1] 徐政. 海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 1-10.  
XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 1-10.

- [2] 杨仁焯, 施刚, 蔡旭. 海上全直流型风电场的电压源型控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 546-557.  
YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu. Voltage source control of offshore all-DC wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 546-557.
- [3] 茹亚伦, 王海云, 李战龙, 等. 基于 CET 变换器的串联型风电全直流系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 13-24.  
RU Yalun, WANG Haiyun, LI Zhanlong, et al. A series connected wind power full DC system based on a CET converter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 13-24.
- [4] XIONG L Y, LI P H, WU F, et al. Stability enhancement of power systems with high DFIG-wind turbine penetration via virtual inertia planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1352-1361.
- [5] NADOUR M, ESSADKI A, NASSER T. Improving low-voltage ride-through capability of a multimegawatt DFIG based wind turbine under grid faults[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 1-13.
- [6] 林伟芳, 任晓钰, 张桂红, 等. 考虑功角稳定和暂态过电压的新能源电压穿越控制参数优化[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1323-1331.  
LIN Weifang, REN Xiaoyu, ZHANG Guihong, et al. Optimization of voltage ride-through control parameters of renewable energy considering power angle stability and transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1323-1331.
- [7] 陈波, 张权旺, 刘柳, 等. 计及 LVRT 的光伏并网系统暂态稳定性分析与参数优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 162-173.  
CHEN Bo, ZHANG Quanwang, LIU Liu, et al. Transient stability analysis and parameter optimization of PV grid-connected systems considering LVRT[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 162-173.
- [8] 冯悻彬, 张后谊, 谢宇哲, 等. 直流微电网中电压源型变流器故障穿越控制协同策略[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 70-76.  
FENG Yibin, ZHANG Houyi, XIE Yuzhe, et al. Control and protection cooperation strategy for a voltage source converter in a DC microgrid during a fault ride-through[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 70-76.
- [9] 郑涛, 邹芑莹, 颜景娴, 等. 适用于高比例风电接入的自适应低电压故障穿越控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4666-4677.  
ZHENG Tao, ZOU Pengying, YAN Jingxian, et al. Adaptive low voltage ride-through control strategy for high proportion of wind access[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4666-4677.
- [10] 任蔷, 陈洁羽, 邓俊, 等. 计及网侧变流器的双馈感应发电机稳态短路电流实用计算方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 141-148.  
REN Qiang, CHEN Jieyu, DENG Jun, et al. Research on practical calculation method of steady-state short circuit current of doubly fed induction generator considering grid side converter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 141-148.
- [11] 丁一凡, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 76-85.  
DING Yifan, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 76-85.
- [12] 王鹏, 王晗, 张建文, 等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1528-1537.  
WANG Peng, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1528-1537.
- [13] 孙丽玲, 王艳娟. 基于 Crowbar 串联电容的双馈风机低电压穿越综合控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2089-2095.  
SUN Liling, WANG Yanjuan. LV ride through control strategy of doubly fed induction generator based on Crowbar series capacitor[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2089-2095.
- [14] 姜惠兰, 贾燕琪, 周陶, 等. 基于定子串联动态电抗的综合低电压穿越策略[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3760-3769.  
JIANG Huilan, JIA Yanqi, ZHOU Tao, et al. Comprehensive LVRT strategy based on dynamic stator series reactance[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3760-3769.
- [15] 黄浩. 直驱式永磁同步风力发电系统低压穿越技术研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.  
HUANG Hao. Research on low voltage ride-through technology of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.
- [16] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅, 等. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 62-67.  
ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei, et al. Comprehensive control strategy for improving low voltage ride through capability of permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 62-67.
- [17] 刘诗涵, 周羽生, 许振华, 等. 基于超级电容蓄能的永磁同步海上风电低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 9-15.  
LIU Shihan, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Research on low-voltage ride through capability of permanent magnetic synchronous offshore wind power based on super-capacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 9-15.
- [18] 蔡婷婷, 穆钢, 严干贵, 等. 提高海上风电场经 MMC 联网系统故障穿越能力的柔性泄能电阻控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 166-173.  
CAI Tingting, MU Gang, YAN Gangui, et al. A flexible control strategy of breaking resistor to enhance fault-ride-through ability for offshore wind farms integrated to grid via MMC[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 166-173.
- [19] 李国庆, 付贵, 王斯忱, 等. MMC 柔性直流输电系统网侧故障时紧急功率支援控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 107-112.

- LI Guoqing, FU Gui, WANG Sichen, et al. Emergency power support control for MMC flexible HVDC transmission system during AC fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 107-112.
- [20] 马大俊, 陈武, 薛晨炀, 等. 低压直流母线 AC-DC 电力电子变压器及其短路故障穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 158-166.
- MA Dajun, CHEN Wu, XUE Chenyang, et al. AC-DC power electronic transformer with low-voltage DC bus and strategy of short-circuit fault ride-through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 158-166.
- [21] 王守相, 王振宇, 刘琪, 等. 含 DAB 型直流变换器的中低压直流配电系统极间短路故障穿越方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 1-7.
- WANG Shouxiang, WANG Zhenyu, LIU Qi, et al. Inter-pole short circuit fault ride through method for medium- and low-voltage DC distribution system with DAB-type DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 1-7.
- [22] 郑涛, 郭勇帆, 吕文轩, 等. 基于电力电子变压器故障穿越策略的低压直流配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 152-161.
- ZHENG Tao, GUO Yongfan, LYU Wenxuan, et al. Protection for low-voltage DC distribution network based on fault ride-through strategy of power electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 152-161.
- [23] 南斌, 徐成司, 董树锋, 等. 考虑多充电模式的充电桩优化控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 2-9.
- NAN Bin, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. Optimized control strategy of charging piles considering multiple charging modes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 2-9.
- [24] 张国玉, 洪超, 陈杜琳, 等. 面向储能电站调度的光储发电系统运行优化策略研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 50-56.
- ZHANG Guoyu, HONG Chao, CHEN Dulin, et al. Operation optimization of photovoltaic-energy storage hybrid system based on scheduling of battery energy storage system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 50-56.
- [25] 安东, 杨德宇, 武文丽, 等. 基于改进多目标蜉蝣算法的配网电池储能系统最优选址定容[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 31-39.
- AN Dong, YANG Deyu, WU Wenli, et al. Optimal location and sizing of battery energy storage systems in a distribution network based on a modified multi-objective mayfly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 31-39.

#### 作者简介:



曹勋哲

曹勋哲(1998), 男, 硕士在读, 研究方向为陆上风电全直流发电系统稳定性(E-mail: 269717639@qq.com);

李凤婷(1965), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与可再生能源与并网技术等;

尹纯亚(1994), 男, 博士, 副教授, 研究方向为交直流混联系统运行与控制。

## Low voltage crossing strategy for all-DC power generation system of onshore wind power based on battery energy storage

CAO Xunzhe, LI Fengting, YIN Chunya, LIU Jiangshan

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** The all-DC system of onshore wind power can effectively solve the problems of harmonic resonance and reactive power transmission, which is the development direction of wind power generation system. The all-DC system of onshore wind power has a low-voltage ride-through (LVRT) capability and can guarantee voltage stability. Based on the topology and operation control strategy of the onshore wind power all-DC power generation system, the surplus power gathered in the DC link of the system is analyzed during the grid-side voltage dips and the applicability of conventional LVRT strategies is analyzed in the wind power all-DC system. Considering the grid requirements for wind power system energy storage configuration and the self-starting characteristics of wind turbines, a LVRT control strategy based on battery energy storage is proposed. This strategy can store the surplus power of the DC bus when low voltage faults occur. The all-DC power generation system of onshore wind power is built by PSCAD/EMTDC, and the proposed strategy is verified by simulation. The results show that the proposed control strategy can improve the low-voltage ride-through capability of the all-DC system of onshore wind power, and promote the rapid recovery of DC bus voltage. Battery storage absorbs surplus energy during faults and provides energy during self-start of the wind turbine. This strategy can improve the utilization of energy and storage.

**Keywords:** onshore wind power all-DC power generation system; fault characteristic; low voltage ride through (LVRT); control strategy; self-starting; battery energy storage; DC bus voltage recovery

(编辑 方晶)