

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230330

基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略

杨玉坤, 许建中

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)可用作大容量风电机组的换流器, 其具有良好前景, 但需要解决风电机组低电压故障时易脱网运行的问题。鉴于此, 提出了一种基于超级电容储能的低电压穿越策略。考虑超级电容的利用效率和变流器的约束条件, 通过 DC-DC 变换器对超级电容的储能模式进行控制, 实现故障期间机、网侧的功率平衡, 以稳定直流侧母线电压。按照海上风电场规定, 确定了故障期间网侧 MMC 有功无功电流分配原则, 向电网提供动态无功以帮助恢复电网电压。仿真结果表明, 当并网点发生故障时, 所提策略不仅能较好地稳定直流母线电压, 保障了 MMC 功率器件安全运行, 还可以补偿无功以改善电网电压, 提高了大容量直驱风电机组的故障穿越能力和运行稳定性。

关键词: MMC; 低电压穿越; 超级电容储能; 子模块过电压; 无功补偿

Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines based on supercapacitor energy storage

YANG Yukun, XU Jianzhong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: The modular multilevel converter (MMC) is a promising prospect as a high-capacity wind turbine converter, but it is necessary to address the issue of easy disconnection during low voltage faults in wind turbines. Thus a low voltage ride-through strategy based on supercapacitor energy storage is proposed. Considering the utilization efficiency of supercapacitors and the constraints of converters, the energy storage mode of supercapacitors is controlled through DC-DC converters, achieving power balance on the machine and network sides during faults and stabilizing the DC bus voltage. From the regulations of offshore wind farms, the active and reactive current distribution principles of a grid-side MMC during faults are determined. This can provide dynamic reactive power support to improve grid voltage. Simulation results show that the proposed strategy can effectively stabilize the DC bus voltage during grid faults, ensure the safe operation of MMC power devices, compensate reactive power to improve grid voltage, and enhance the fault ride-through capability and operational stability of large-capacity direct-drive wind turbine generators.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277094).

Key words: MMC; LVRT; super capacitor energy storage; sub-module overvoltage; reactive power compensation

0 引言

海上风电相比于陆上风电具有风能资源丰富、风速稳定、节约占地面积等优点^[1], 在“双碳”背景下, 近年来得到了大规模开发。为节约建设成本、提高风能转化效率, 海上风力发电机组朝着单机大容量趋势发展^[2-3]。随着海上风电机组的大容量发展, 为降低电流额定值减小系统损耗, 海上风电机组的

电压等级逐渐从低压等级提升到中高压等级^[4-6]。海上风电单机大容量和中高压化发展对全功率风电换流器提出了更高的容量和耐压要求^[7]。目前大功率海上风电变流器多通过两电平、三电平变流器并联的方式提高换流容量, 但这对功率器件的一致性提出了很高的要求, 同时均压均流会增加系统控制的复杂程度^[8]。且当机端电压提高到 6 kV 及以上时, 两电平、三电平拓扑均不再适用^[10]。

增加变换器电平数可降低功率器件所需的电压等级, 提高变换器效率^[11], 其中模块化多电平换流

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277094)

器(modular multilevel converter, MMC)通过低压子模块串联提高变流器的电压和功率等级,可按照系统需求灵活扩展电压和功率等级,相较于其他多电平换流器,具有谐波含量低、控制灵活、模块化设计、无换相失败等优点^[12],MMC 用作大容量中压直驱风电机组背靠背换流器具有良好前景。MMC 风电变流器成为目前大容量中压风电机组换流器的研究热点^[15],其主要集中在解决机侧 MMC 低频工况下子模块电容电压波动较大的问题,文献[14]提出了一种同时注入高频正弦环流和高频正弦电压的方法,可抑制大量基频电容电压波动;文献[15]提出一种针对风力发电的二倍频环流注入策略;文献[16]针对大容量直驱风电机组机侧 MMC,提出一种复合二倍频环流和高频注入的子模块电容电压波动抑制方法。以上研究均为针对 MMC 风电变流器的低频工况下子模块电容电压波动抑制方法,而针对大容量直驱风电机组经背靠背 MMC 送出系统的低电压穿越策略鲜有报道。

随着海上风电机组朝着大容量中压化发展,在风电机组并网点低电压故障期间,若通过直接将机组被迫切出电网的方式来保护风电机组的安全,将可能导致电网再一次失去电源,造成系统性“电压崩溃”^[17],因此大容量直驱风电机组的低电压穿越对电网稳定运行至关重要,现有的低压永磁直驱风电机组低电压故障穿越策略可归纳为两种方案:(1)改善故障期间控制策略;(2)添加额外装置配合变流器协调控制。文献[18]提出通过采用紧急变桨距角技术,减少故障期间风机的出力,限制变流器直流母线的过电压。文献[19]提出了一种机侧变流器控制直流电压稳定,网侧变流器实现最大功率跟踪的新型控制策略。以上通过控制策略的改善实现低电压故障穿越,实质上为利用风轮机转子承担故障期间的不平衡功率,需要不断调整风机运行状态,不利于永磁直驱风机的稳定运行,需要配合其他方法使用。文献[20]提出在风电机组并网点装备耗能电阻电路消耗故障期间不平衡功率,但会造成能量的浪费,同时需要解决耗能电路长期处于投入状态的散热问题。永磁直驱风电机组直流侧并联储能装置维持故障期间功率平衡成为目前的研究热点^[23]。文献[21]提出了采用超导磁储能-超导故障限流系统来平滑风电机组的有功输出,改善故障穿越能力。文献[22]提出在风电机组直流侧装备 Buck-boost 超级电容储能电路,吸收故障期间直流侧两端的不平衡功率,稳定直流母线电压,同时与网侧变流器协调控制有功无功功率的输出。文献[23]将超级电容和锂电池组成的混合储能系统应用于直驱风电机

组,抑制故障期间直流母线电压的升高。采用储能装置的低电压穿越方案响应速度快,能较好地提高故障期间系统的可靠性,但针对大容量直驱风电机组,以上采用单个储能电路的低电压穿越方案不能满足系统电压和容量需求,同时需要进一步研究低电压穿越策略与 MMC 风电变流器运行的配合控制。

本文针对大容量中压永磁直驱风机经背靠背 MMC 送出风电机组,提出基于超级电容储能的低电压穿越策略,其中 Buck-boost 超级电容储能电路通过级联提高储能系统电压等级,增加超级电容储能的总容量。风机通过加速减载降低故障期间不平衡功率,网侧 MMC 按照低电压穿越标准合理设计了有功无功电流分配原则,针对不对称故障设计了负序电流抑制控制器,防止不对称的电流过流。风机与超级电容储能系统配合吸收故障期间直流侧冗余功率,有效稳定直流母线电压,防止故障期间 MMC 子模块过电压,按照典型低电压穿越曲线提出了超级电容容量设计方法。最后在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建仿真模型对所提低电压穿越策略的有效性进行验证。

1 大容量直驱风电机组拓扑及故障运行特性

1.1 MMC 风电变流器及超级电容储能系统结构

海上风电经柔性直流输电送出结构如图 1 所示,机侧 MMC 为 uvw 三相,网侧 MMC 为 abc 三相,机侧和网侧 MMC 间的直流环节并联有超级储能系统。

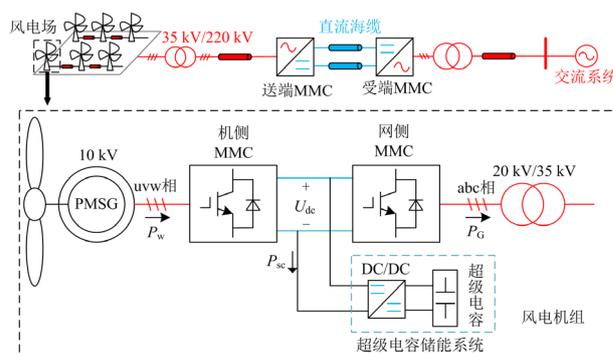


图 1 海上风电经柔性直流输电送出结构图

Fig. 1 Structure of offshore wind power transmission via flexible DC transmission

如图 1 所示,大容量中压永磁直驱风电机组采用文献[13-16]所提 MMC 作为风电变流器结构, U_{dc} 表示直流母线电压, P_w 为风机向变流器输送的有功功率, P_g 为网侧变流器向电网送出的有功功率, P_{sc} 为流向超级电容储能系统的有功功率,忽略变流器

和线路损耗, 系统的功率平衡关系为

$$P_w = P_G + P_{sc} \quad (1)$$

直流侧并联超级电容储能系统以吸收故障期间的不平衡功率, 超级电容储能系统拓扑如图 2 所示。

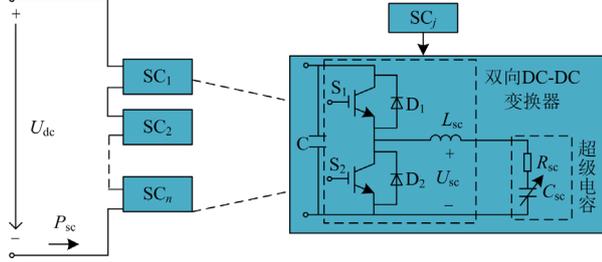


图 2 超级电容储能系统拓扑

Fig. 2 Topology of supercapacitor energy storage system

图 2 中多个 Buck-boost 储能电路级联提升了储能系统电压等级, 增加超级电容储能的总容量。\$L_{sc}\$ 为超级电容滤波电感, 理想电容 \$C_{sc}\$ 与等效电阻 \$R_{sc}\$ 串联构成超级电容结构, \$U_{sc}\$ 表示超级电容电压。

1.2 MMC 风电变流器低电压故障特性分析

故障穿越是指在风机机组并网点发生对称及不对称电压跌落时, 防止风电机组器件过电流过电压而引发风机脱网。对于 MMC 风电变流器, 直流电压的稳定是故障穿越的关键^[24], 不平衡功率与直流电压的关系为

$$\begin{cases} \Delta P = P_w - P_G = \frac{1}{2} C_{eq} \frac{dU_{dc}^2}{dt} \\ P_G = 1.5 U_c I_{gd} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$\Delta P\$ 为不平衡功率; \$C_{eq}\$ 为 MMC 直流侧等效电容; \$U_c\$ 为风电机组并网点电压; \$I_{gd}\$ 为网侧变流器 \$d\$ 轴有功电流。由于网侧变流器的限流作用, 电压跌落期间, 有功电流 \$I_{gd}\$ 不能按照电压跌落程度同比例增大, 网侧变流器向电网送出的有功功率减小 \$P_G\$, 而风机向机侧 MMC 输送的有功功率 \$P_w\$ 不变, 造成两侧功率的不平衡, 若不能合理地处理直流侧冗余的功率, 将会造成直流电压的升高。对于 MMC 风电变流器, 直流电压由于子模块电容电压支撑, 故障期间将导致子模块电容过电压, 造成功率器件的损坏, 引发风电机组脱网。因此低电压穿越的关键是合理地解决故障期间直流侧的冗余功率, 一方面需降低故障期间风机向机侧 MMC 输送的功率, 同时由储能系统吸收剩余的不平衡功率。

针对不对称故障, 为了阻断零序电流, 网侧 MMC 换流变压器通常采用 Y/\$\Delta\$ 接法。因此, 当系统发生不对称故障时, 网侧 MMC 交流出口电压电

流仅由正序和负序分量组成。以 a 相为例, 桥臂电流和电压可分别表示为

$$\begin{cases} i_{pa} = \frac{I_{dc}}{3} + I_{2f} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \frac{I^+ \sin(\omega t - \alpha^+)}{2} + \frac{I^- \sin(\omega t - \alpha^-)}{2} \\ i_{nb} = \frac{I_{dc}}{3} + I_{2f} \sin(2\omega t + \varphi_2) - \frac{I^+ \sin(\omega t - \alpha^+)}{2} - \frac{I^- \sin(\omega t - \alpha^-)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{pa} = \frac{U_{dc}}{2} - U^+ \sin(\omega t + \beta^+) - U^- \sin(\omega t + \beta^-) \\ u_{na} = \frac{U_{dc}}{2} + U^+ \sin(\omega t + \beta^+) + U^- \sin(\omega t + \beta^-) \end{cases} \quad (4)$$

式中: \$i_{pa}\$、\$i_{na}\$ 分别为上、下桥臂电流; \$I_{dc}\$ 为直流电流; \$u_{pa}\$、\$u_{na}\$ 分别为上、下桥臂电压; \$\omega\$ 为系统运行角频率; \$I^+\$、\$I^-\$ 分别为交流侧正序和负序电流幅值; \$\alpha^+\$、\$\alpha^-\$ 分别为交流侧正序和负序电流相角; \$U^+\$、\$U^-\$ 分别为交流侧正序和负序电压幅值; \$\beta^+\$、\$\beta^-\$ 分别为交流侧正序和负序电压相角; \$I_{2f}\$ 为二倍频环流幅值; \$\varphi_2\$ 为二倍频环流相角。由式(3)和式(4)可求得 a 相瞬时功率, 其表达式为

$$\begin{cases} p_a = p_{pa} + p_{na} = p_{a0} + p_{a1} + p_{a2} \\ p_{a0} = \frac{I^+ U^-}{2} \cos(2\omega t - \alpha^+ + \beta^+) + \frac{I^- U^+}{2} \cos(2\omega t - \alpha^- + \beta^-) \\ p_{a1} = \frac{I^- U^-}{2} \cos(2\omega t - \alpha^- + \beta^-) \\ p_{a2} = \frac{I^+ U^+}{2} \cos(2\omega t - \alpha^+ + \beta^+) + U_{dc} I_{2f} \sin(2\omega t + \varphi_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中: \$p_a\$ 为 a 相桥臂总功率; \$p_{pa}\$、\$p_{na}\$ 分别为上、下桥臂功率; \$p_{a0}\$ 为桥臂功率零序分量; \$p_{a1}\$ 为桥臂功率正序分量; \$p_{a2}\$ 为桥臂功率负序分量。

由瞬时功率表达式可知, 不对称故障期间, 桥臂功率由正序、负序和零序分量构成, 其中正序和负序分量在三相间循环流动, 不会体现在直流侧, 而零序二倍频分量可流向直流侧, 会引起直流电压的二倍频波动, 同时交流侧输出功率也会存在二倍频功率分量。因此, 通过抑制负序电流 \$I^- = 0\$, 可将零序功率中的 \$I^- U^+\$ 项消除, 减小直流电压波动, 同时维持 MMC 三相输出电流对称, 防止不对称电

流引起桥臂功率器件过流。

2 基于超级电容储能的低电压故障穿越协调控制策略

针对大容量永磁直驱风机经背靠背 MMC 送出风电机组, 基于超级电容储能系统的低电压故障穿越策略由机侧 MMC、网侧 MMC 和超级电容储能系统协调配合实现, 其中机侧 MMC 通过加速减载控制以降低故障期间直流母线两端的不平衡功率,

网侧 MMC 需要按照《风电场接入电网技术规定》向电网提供一定的无功功率以帮助电压恢复, 超级电容储能系统则通过双闭环控制吸收故障期间的不平衡功率, 稳定直流母线电压。包含超级电容储能系统的大容量直驱风电机组通过各部分控制策略的改善, 共同配合实现风电机组的低电压故障穿越, 保障功率器件的安全运行。系统整体低电压故障穿越协调控制策略如图 3 所示, 下面对各部分控制策略的改善分别进行叙述。

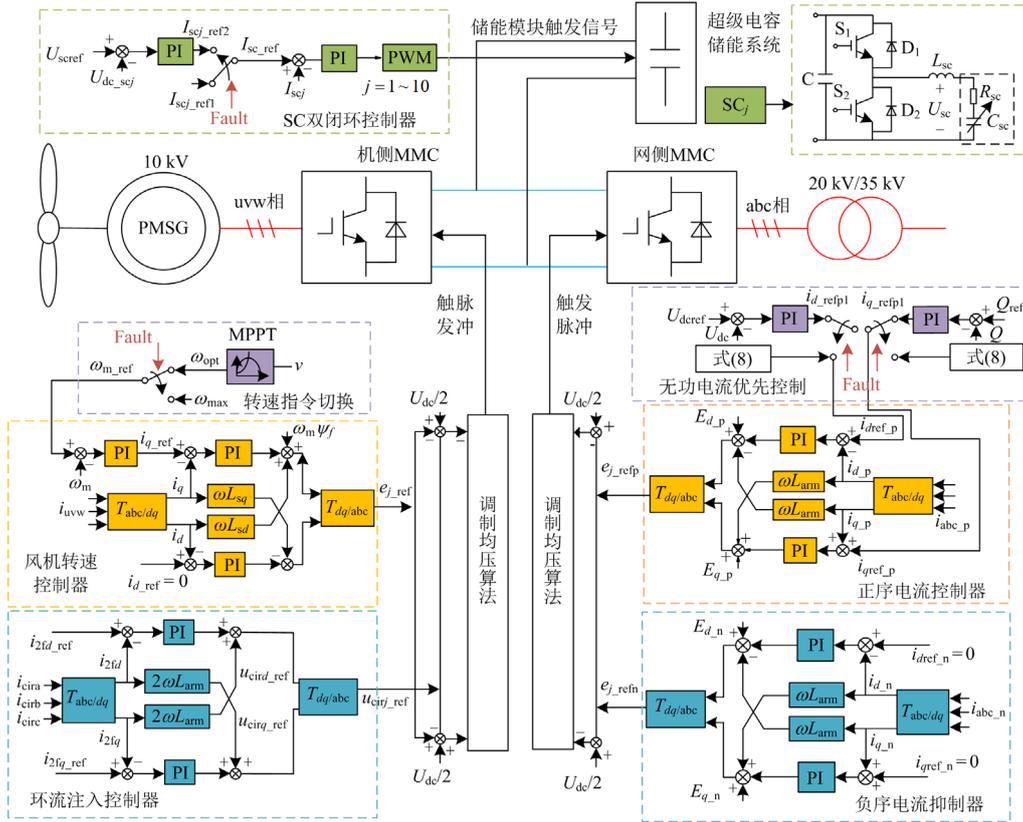


图 3 系统故障穿越控制策略

Fig. 3 General diagram of system fault ride-through strategy control

2.1 机侧 MMC 控制策略

机侧 MMC 的主要控制目标为稳态时通过风机的转速控制实现最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT), 向直流侧输送稳定的功率。当并网点发生低电压故障时, 调整功率运行点减小风机向直流侧输送的功率 P_w , 降低直流侧两端的不平衡功率。同时为解决机侧 MMC 低频工况下子模块电容电压较大的问题, 采用二倍频环流注入策略抑制电容电压波动。

稳态运行时风机运行在最大功率点, 忽略风轮机的能量损耗, 风机从风能中获取的功率为

$$P_w = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (6)$$

式中: ρ 空气密度; R 为风轮机半径; v 为风速; C_p 为风能利用率, 其大小由桨距角 β 和叶尖速比 λ 共同决定, 具体可表示为

$$\begin{cases} C_p(\rho, \lambda) = 0.1576\left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5\right)e^{\frac{-21}{\lambda_1}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \\ \lambda = \frac{\omega_m R}{v} \end{cases} \quad (7)$$

叶尖比 λ 由风机转速 ω_m 和风速 v 决定, 当桨距角 β 一定时, 存在一个最佳叶尖速比使得风能利用

系数最大, 进而使风电机组运行于最大功率点。图 4 为在不同的桨距角下, 风能利用率与叶尖速比 λ 的关系曲线。

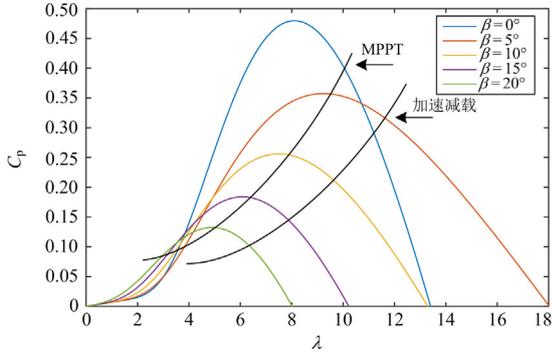


图 4 变桨距角的风能利用率曲线

Fig. 4 Wind energy utilization curve for variable pitch angle

低电压故障期间风机通过提高转速、叶尖速比、减小风能利用系数来降低风机故障期间的有功出力, 进而达到减小故障期间直流侧两端不平衡功率的目的。加速减载仅依赖风机自身的调节能力, 但风机存在最大转速限制 $1.2\omega_N$, ω_N 为风机转速额定值。通过降低风机有功出力来平衡直流母线两侧功率, 只能应对小幅度电压跌落工况, 鉴于风机脱网事故多为并网点发生严重的电压跌落, 因此故障期间转速维持在最大值 $\omega_{max} = 1.2\omega_N$, 剩余的不平衡功率由超级电容储能系统吸收。通过降低风机功率运行点减小了故障期间的不平衡功率, 可减少储能系统的容量配置。

永磁直驱风机端口频率较低, 机侧 MMC 运行于低频工况下, 子模块电容电压波动较大, 过大的电容电压波动会影响风机控制的稳定性, 容易造成子模块过电压, 因此采用二倍频环流注入策略抑制电容电压波动。二倍频环流注入由图 3 中的环流注入控制器实现, 图中 i_{2fd_ref} 、 i_{2fq_ref} 分别为 d 、 q 轴二倍频电流参考值, i_{2fd} 、 i_{2fq} 分别为三相环流坐标变换得到的 d 、 q 轴二倍频环流, 通过电流闭环控制得到 d 、 q 轴二倍频环流电压参考值 u_{cirfd_ref} 、 u_{cirfq_ref} , 坐标变换得到的三相二倍频电压参考波 u_{cirj_ref} 叠加到 MMC 调制波中, 实现二倍频环流的注入。

2.2 网侧 MMC 控制策略

网侧变流器应在风电场故障穿越时具备规定的动态无功支撑能力和有功控制能力。稳态运行期间, 网侧有功电流指令由直流电压外环给定。当发生低电压故障时, 网侧变流器切换为无功优先模式, 向电网输送一定的无功功率帮助电压恢复, 此时有功电流受变流器最大电流限制, 按照《风电场接入电

网技术规定(修订本)》, 有功无功电流指令可由式(8)给定。

$$\begin{cases} i_{qref_p} \geq 1.5 \times (0.9 - U_e) I_N, & 0.2 \leq U_e \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ i_{dref_p} = -\sqrt{i_{max}^2 - i_{qref_p}^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{dref_p} 、 i_{qref_p} 分别为 d 轴、 q 轴正序有功电流、无功电流; U_e 为并网点电压; I_N 为额定电流; i_{max} 为网侧变流器输出电流最大值。

按照规定中典型低电压穿越曲线, 电压跌落及恢复过程中无功电流给定值的变化曲线如图 5 所示, 图中红线表示电压跌落及恢复过程。为保证大容量直驱风电机组在规定的低电压故障期间不脱网运行, 应在图 5 中的典型电压跌落及恢复工况下设计超级电容储能系统容量。

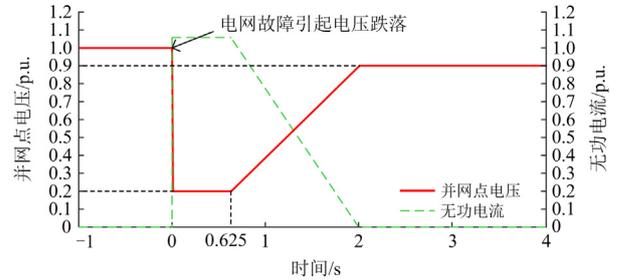


图 5 电网电压与无功电流关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of grid voltage and reactive current

图 5 中红色标准低电压穿越曲线上方要求风电机组不脱网运行, 在电压跌落及恢复过程中无功电流指令可表示为

$$i_{qref_p} = \begin{cases} 1.05I_N, & 0 < t \leq 0.625 \text{ s} \\ 1.05I_N - \frac{42}{55}(t - 0.625)I_N, & 0.625 \text{ s} < t \leq 2 \text{ s} \\ 0, & t > 2 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

为减小系统发生不对称电压跌落时直流电压的二倍频波动, 同时使得三相电流对称, 防止不对称电流引起桥臂功率器件过流, 网侧变流器采用负序电流闭环控制以消除 MMC 交流侧的负序分量, 具体可见图 3 中的负序电流抑制控制器, $i_{dref_n} = 0$ 、 $i_{qref_n} = 0$ 分别为输出电流的 d 、 q 轴负序分量, 负序参考电压 e_{j_refn} 叠加到网侧 MMC 调制波中实现负序电流的抑制。

2.3 超级电容储能系统控制及其容量配置

机侧 MMC 通过加速减载控制只能一定程度地减小低电压故障下的不平衡功率, 剩余的不平衡功率需由超级电容储能系统吸收。超级储能系统通过多个 Buck-boost 超级电容储能电路级联提高直流侧电

压, 故障期间的不平衡功率由多个超级电容储能电路共同承担, 每个储能电路具有单独相同的控制结构。

Buck-boost 超级电容储能电路具有双向能量流通过路径, 当并网点发生低电压故障引起直流母线电压 U_{dc} 升高时, 各模块储能电路工作在 **buck** 降压模式, 此时超级电容处于充电状态, 从直流侧吸收能量, 当故障结束或网侧 MMC 有功功率高于机侧 MMC 时, 储能电路工作在 **boost** 升压模式, 超级电容处于放电状态, 向直流侧释放能量。超级电容储能系统通过吞吐故障期间的不平衡能量, 平衡直流母线两端有功功率, 稳定直流母线电压。

当检测到低电压故障时, 储能电路切换为稳定直流侧电压的双闭环控制, 直流侧电压控制环为

$$I_{scj_ref2} = (k_p + \frac{k_i}{s})(U_{sc_ref} - U_{dc_scj}) \quad (10)$$

式中: k_p 、 k_i 分别为电压控制环的比例系数和积分系数; U_{sc_ref} 为每个储能电路直流侧电压参考值, $U_{sc_ref} = U_{dc} / m$, m 为储能系统中储能电路个数; U_{dc_scj} 为储能电路直流侧电压; I_{scj_ref2} 为内环超级电容电流参考值, 通过直流侧电压的双闭环控制实现故障工况下不平衡功率的吸收。

当稳态运行或故障结束时, 超级电容储能电路切换为单环控制, 超级电容电流参考值切换为 I_{scj_ref1} , 其中稳态时 $I_{scj_ref1} = 0$, 防止储能系统从直流侧吸收能量, 风机向直流侧送出的有功功率能完全经网侧 MMC 送出。故障结束后, 超级电容将故障期间吸收的能量通过小电流释放, 电容电压恢复至初始值 U_{sc_min} , 为下次电网发生电压跌落故障作储能准备, 此时 I_{scj_ref1} 受网侧换流器最大送出功率限制, 有

$$I_{scj_ref1} = \frac{1.5U_e i_{max} - P_w}{mU_{sc_ref}} \quad (11)$$

超级电容储能电路控制逻辑框如图 6 所示。

由于在低电压故障恢复过程中, 网侧变流器工作在输出电流极限 i_{max} , 电压恢复后期网侧变流器输出功率会超过额定功率。设在 t_{sc} 时刻, 网侧变流器的输出功率 P_G 与机侧变流器的有功功率 P_w 相等, 在 $0 \sim t_{sc}$ 时段, 超级电容储能系统向直流侧吸收不平衡功率, 对应不平衡能量的积累过程; 在 $t_{sc} \sim 2$ s 时段, 超级储能系统向直流侧释放部分能量使得网侧变流器工作在有功功率输出极限, 电压跌落及恢复期间超级电容储能系统积累的不平衡能量可表示为

$$W_{sc} = P_w t_{sc} - \frac{1}{2} J (\omega_{max}^2 - \omega_N^2) - \int_0^{t_{sc}} P_G dt \quad (12)$$

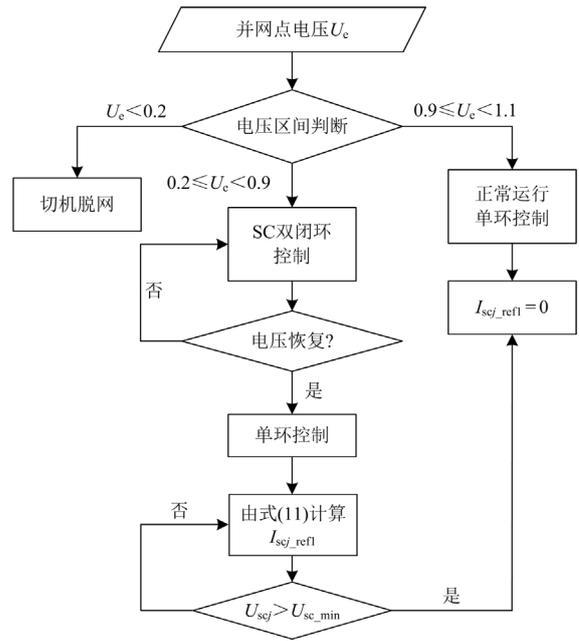


图 6 储能电路控制框图

Fig. 6 Control block diagram of energy storage circuit

式中: W_{sc} 为储能系统吸收的不平衡能量; J 表示风轮机转动惯量, 网侧变流器输出的有功功率 P_G 由式(2)、式(8)和式(9)计算得到。假设不平衡能量由各个超级电容储能电路平均吸收, 则单个超级电容储能电路积累的能量 $W_{scj} = W_{sc} / m$ 、超级电容吸收的能量与电压的关系为

$$W_{scj} = \frac{1}{2} C_{sc} (U_{sc_max}^2 - U_{sc_min}^2) = W_{max} (1 - h^2) \quad (13)$$

式中: U_{sc_min} 、 U_{sc_max} 分别为超级电容初始电压和最大电压; C_{sc} 为超级电容容量; W_{max} 对应超级电容处于最大电压时的能量; h 为充放电深度, $h = U_{sc_min} / U_{sc_max}$ 。超级电容的荷电状态 (state of charge, SOC) 与其利用效率有关, 具体可表示^[25]为

$$S_j = \frac{W_{max} - W_{scj}}{W_{max}} = \frac{U_{sc}^2}{U_{sc_max}^2} \quad (14)$$

式中, S_j 表示第 j 个储能电路中超级电容的 SOC, 实际中超级电容充放电深度 h 一般取值 50%^[26], 此时超级电容 SOC 变化范围为 0.25~1, 储能系统利用率较高。同时需要考虑 Buck-boost 变换器两端电压变比的合理, 一般设置 DC-DC 变换器电压变比范围为 0.25~0.75, 结合式(12)、式(13)可估算到超级电容容量 C_{sc} 。

3 仿真实验

为验证本文所提低电压穿越策略的有效性, 在

PSCAD/EMTDC 中搭建了包含超级电容储能的永磁直驱风机经背靠背 MMC 送出系统仿真模型, 系统主要参数如表 1 所示。

3.1 稳态工况仿真验证

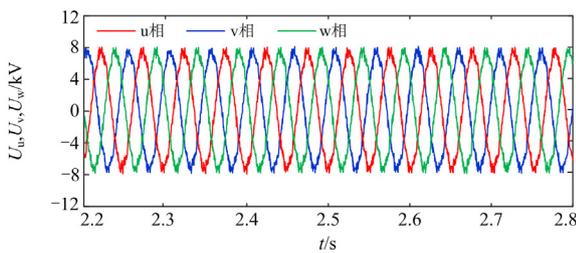
首先仿真验证系统处于稳态工况下的运行情况。永磁直驱风机出口频率较低, 为解决机侧 MMC 运行于低频工况下子模块电容电压波动较大的问题, 采用文献[16]中的二倍频环流注入策略抑制电容电压波动, 稳态仿真结果如图 7 所示。

稳态工况下, 风机运行于最大功率跟踪点处, 由图 7(a)可知, 三相电压具有良好的对称性, 可实现稳定的最大功率送出。图 7(b)为机侧 u 相 MMC 子模块电容电压均值, 采用二倍频环流注入策略后, 电容电压波动由 399 V 降低为 219 V, 降低了 45.1% 的电容电压波动, 有效解决了机侧 MMC 低频工况

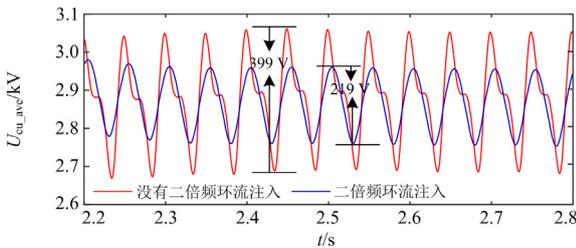
表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of the simulation system

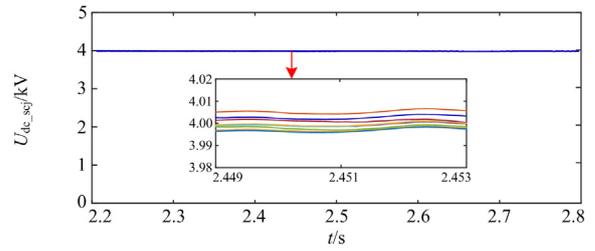
系统参数	数值
风机额定功率/MW	15
风机额定电压/kV	10
机侧额定频率/Hz	20
网侧额定电压/kV	20/35
直流母线电压 U_{dc} /kV	40
MMC 子模块个数 n	14
机侧 MMC 子模块电容容量/mF	20
网侧 MMC 子模块电容容量/mF	10
储能模块个数 m	10
超级电容初始电压 U_{sc_min} /kV	1
超级电容容量 C_{sc} /F	1
储能单元电感 L_{sc} /H	0.01



(a) 风机出口电压



(b) u相MMC子模块电容电压均值



(c) 超级电容储能电路直流侧电压

图 7 稳态工况仿真结果

Fig. 7 Simulation results for steady state conditions

下电容电压波动较大的问题。图 7(c)为 10 个储能模块高压直流侧电压, 稳态工况下单个储能电路直流侧电压能稳定在 4 kV, 这是由于储能系统稳态工况下处于开环 $I_{scj_ref1} = 0$ 控制模式, 风机通过机侧 MMC 向直流侧输送的功率完全经由网侧 MMC 送出, MMC 直流侧两端功率平衡, 直流电压能够保持稳定, 多个储能电路级联以匹配 MMC 直流母线电压等级。

3.2 标准低电压穿越仿真验证

为验证所提策略应对标准低电压穿越曲线的有效性, 按照图 5 仿真设置了典型的三相低电压跌落及电压恢复工况, 即海上风电场并网点电压跌落幅度 80%且持续时间为 0.625 s, 电压在跌落后的 2 s 内能重新恢复到额定电压的 90%~100%, 仿真结果如图 8 所示。

图 8(a)为并网点三相电压波形, 3 s 时三相电压跌落 80%, 持续时间为 0.625 s, 5 s 时电压恢复至 90%额定电压。由图 8(b)的系统有功无功功率变化曲线可知, 电压跌落后, 网侧输出功率 P_G 受变流器限流作用迅速下降, 风机通过加速减载减小风机有功出力 P_w , 两侧 MMC 功率不平衡造成直流侧不平衡能量积累。随着并网点电压恢复, 网侧变流器输出功率逐渐回升, 在 $t_{sc} = 4.7$ s 时, 直流母线两侧功率相等, 不平衡能量积累达到最大值。在电压跌落及恢复过程中, 网侧 MMC 发出的无功功率 Q_G 可及时进行动态调整。图 8(c)为直流电压波形, 故障期间若只对网侧 MMC 进行电流限幅, 不平衡功率引起直流电压大幅度上升, 造成 MMC 子模块过电压, 使得风电机组低电压穿越失败。接入储能系统吸收不平衡功率, 直流母线电压在故障期间可保持稳定, 说明所提策略可较好地实现标准低电压穿越。

由图 8(d)储能系统功率变化曲线可知, 在 3 s~ t_{sc} 内, 储能系统吸收不平衡功率, $t_{sc} \sim 3$ s 为电压恢复后期的放能阶段, 这是由于网侧变流器工作在输出电流极限 i_{max} , 电压恢复后期网侧变流器输出功

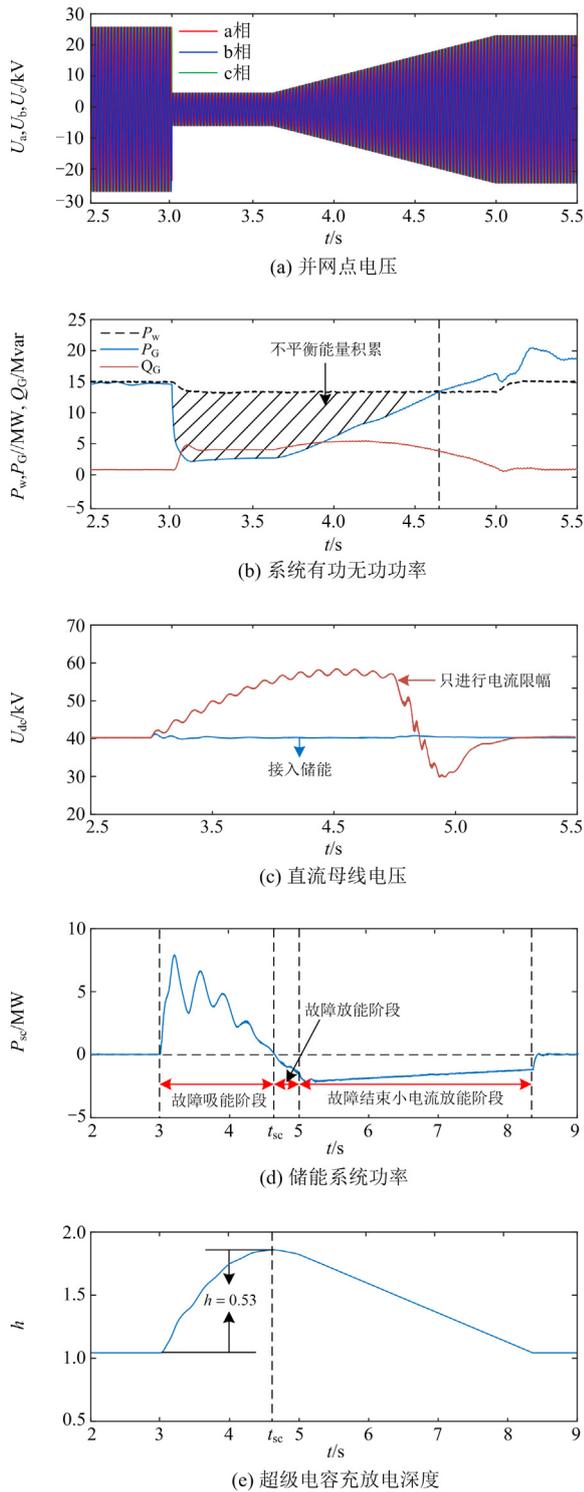


图8 标准低电压穿越仿真结果

Fig. 8 Simulation results of standard low voltage ride-through
 率超过额定功率, 储能系统会向网侧释放部分能量。 $t_{sc} = 5$ s后, 储能系统通过小电流向网侧释放故障期间积累的能量, 当超级电容恢复至初始电压后,

储能系统功率变化为 0, 结束与直流母线的能量交换。3~ t_{sc} 内积累的最大不平衡能量为 14 860 kJ, 通过式(12)、式(13)估算得到的超级电容容量为 1 F, 由图 8(e)超级电容电压波形可见, 超级电容充放电深度 $h = 0.53$, 储能系统利用率较高, 5 s后超级电容电压逐渐恢复到初始值以应对下一次低电压穿越。

3.3 单相接地故障仿真验证

为验证所提低电压穿越策略应对不对称故障的有效性, 进行了单相接地故障仿真验证。仿真结果如图 9 所示。

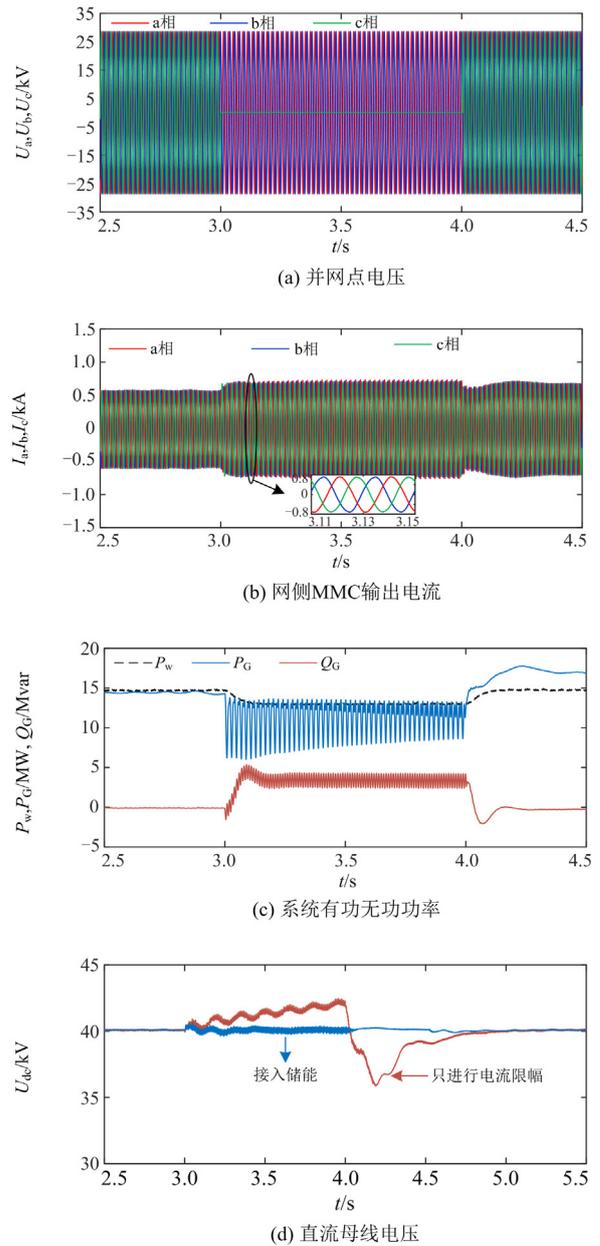


图9 单相接地故障仿真结果

Fig. 9 Simulation results of single line-to-ground fault

如图 9(a)所示的并网点三相电压波形, 在 3 s 时并网点发生 c 相接地故障, 故障持续时间为 1 s。图 9(b)为网侧 MMC 输出电流, 由于对输出电流的负序分量进行了抑制, 在不对称故障期间 MMC 输出电流仍能维持三相对称。由图 9(c)可见, 风电机组并网点发生不对称电压跌落, 两端 MMC 有功功率不平衡, 风机通过加速减载降低向网侧输送的有功功率 P_w , 网侧 MMC 主动调整输出一定的无功功率, 由于负序电压的存在, 网侧 MMC 输出有功无功功率均包含二倍频波动分量, 这与 1.2 节系统低电压故障特性理论分析一致。故障结束后, 超级电容需要持续一段时间放电, 因此 4 s 后有功功率会大于额定功率, 直至超级电容恢复至初始电压。图 9(d)为直流母线电压波形, 若只对网侧 MMC 采取电流限幅措施, 在单相接地故障期间直流母线会上升超过 1.05 p.u., 且故障结束后, 直流母线电压需要较长时间才能恢复至额定值, 此时风电机组易触发过电压保护而切出, 影响电网的稳定运行。投入本文所提基于超级电容储能的低电压穿越策略, 在单相接地故障期间直流母线电压稳定在额定值附近, 系统能够维持安全稳定运行, 说明本文所提低电压穿越策略能较好地应对单相接地故障。

3.4 两相接地故障仿真验证

本文接着进行了两相接地故障的仿真验证, 3 s 时设置并网点发生两相接地故障, 故障持续时间为 1 s。仿真结果如图 10 所示。

如图 10(a)为并网点三相电压波形, 3 s 时并网点发生两相接地故障, 4 s 时电压恢复。图 10(b) 为网侧 MMC 输出电流, 在两相接地故障期间, 抑制电流负序分量可维持 MMC 输出电流三相对称。图 10(c)为风电机组有功无功功率波形, 相较于单相接

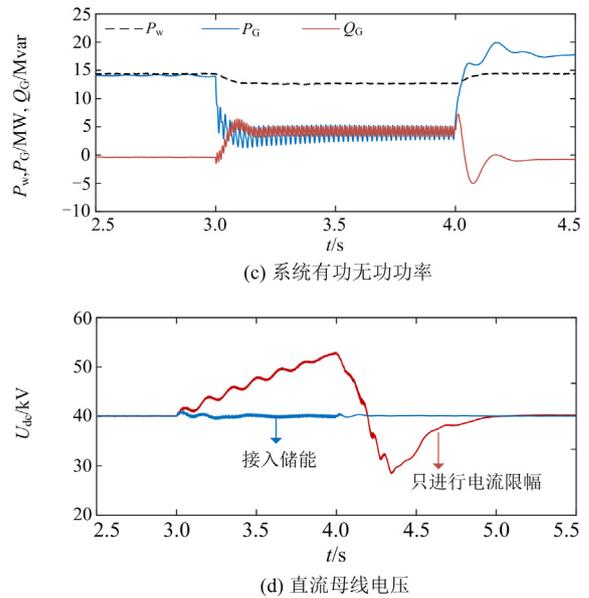
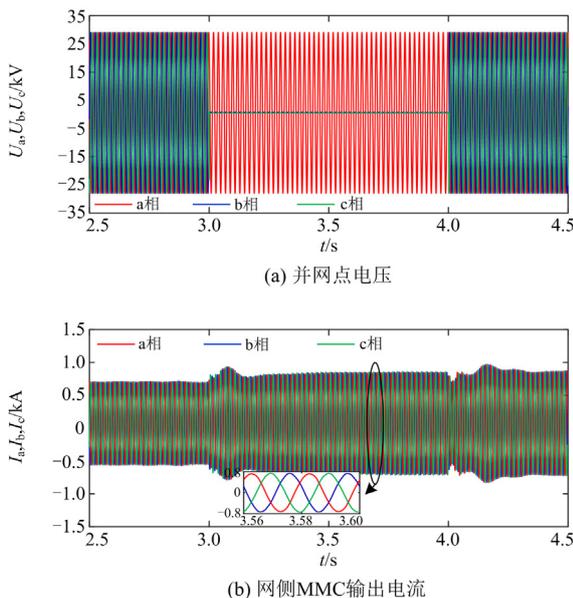


图 10 两相接地故障仿真结果

Fig. 10 Simulation results of two-phase-to-ground fault

地故障, 两相接地故障下机、网两端 MMC 功率不平衡程度更大。网侧 MMC 可主动调整输出一定的无功功率。图 10(d)为直流母线电压波形, 当只对网侧 MMC 采取电流限幅措施时, 不平衡功率将引起直流母线显著上升, 超过 1.25 p.u., 造成 MMC 子模块过电压, 子模块保护闭锁使得低电压穿越失败。应用本文所提低电压穿越策略, 在两相接地故障期间直流母线电压稳定在额定值附近, 系统能够维持安全稳定运行, 说明本文所提低电压穿越策略能较好地应对不对称电压跌落故障。

4 结论

本文针对大容量中压永磁直驱风机经背靠背 MMC 送出风电机组, 揭示了并网点发生低电压故障期间 MMC 风电变流器直流电压骤升机理和低电压故障系统特性, 提出了基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略。

1) 风机与超级电容储能系统共同配合解决低电压故障期间机、网能量不平衡问题, 超级电容储能电路通过级联提高储能系统电压等级, 增加超级电容储能的总容量。按照典型低电压穿越曲线对超级电容容量进行了合理设计, 可在一定程度上减小超级电容容量, 降低系统成本。

2) 设计了故障期间网侧 MMC 有功无功分配原则, 可保持正常运行时的有功控制能力, 同时可按海上风电场规定进行动态无功补偿。仿真结果表明, 风电机组并网点电压跌落期间, 所提低电压穿

越策略能较好地稳定直流母线电压, 保障 MMC 功率器件安全运行, 同时向电网提供动态无功支撑, 维持大容量直驱风电机组安全稳定运行。

3) 本文所提 MMC 风电变流器直流侧并联超级电容储能系统结构, 可进一步补充研究其平抑功率波动、为电网提供惯量支撑和频率调节等功能, 对提升风电并网技术提供了多重新思路, 具有一定工程实际应用前景。

参考文献

- [1] 李国庆, 徐亚男, 江守其, 等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 111-119.
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 111-119.
- [2] 王志新, 吴杰, 徐烈, 等. 大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 14-27.
WANG Zhixin, WU Jie, XU Lie, et al. Key technologies of large offshore wind farm VSC-HVDC converters for grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 14-27.
- [3] 姚钢, 杨浩猛, 周荔丹, 等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33-47.
YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47.
- [4] 曹海洋, 沈建辉, 姜子健, 等. 基于双混合钳位式变流器的永磁直驱风力发电系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 32-40.
CAO Haiyang, SHEN Jianhui, JIANG Zijian, et al. Control strategy of permanent magnet direct-driven wind generation system based on hybrid clamp dual PWN rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 32-40.
- [5] 荣飞, 严家俊, 孙文隆, 等. 基于 H-MMC 的直驱式永磁同步风力发电系统的运行与控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 38-45.
RONG Fei, YAN Jiajun, SUN Wenlong, et al. Operation and control of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system based on H-MMC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 40(1): 38-45.
- [6] 曾翔君, 张宏韬, 李迎, 等. 大功率直驱风电系统高效率变流器设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 15-21.
ZENG Xiangjun, ZHANG Hongtao, LI Ying, et al. Design of high-efficiency converters for large direct-drive wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 15-21.
- [7] YARAMASU V, WU B. Predictive control of a three-level boost converter and an NPC inverter for high-power PMSG-based medium voltage wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5308-5322.
- [8] 陈根, 蔡旭. 提升并联型风电变流器运行效率的自适应功率优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6492-6499, 6761.
CHEN Gen, CAI Xu. Adaptive power optimal control for operation efficiency improvement of parallel wind power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6492-6499, 6761.
- [9] 阳敏, 罗安, 肖华根, 等. 多逆变器并联系统环流分析及抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10): 6-11.
YANG Min, LUO An, XIAO Huagen, et al. Circulating current analysis and suppression method for multi-inverter parallel system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2017, 29(10): 6-11.
- [10] 姜卫东, 赵德勇, 胡杨, 等. 基于载波实现的二极管钳位型三电平逆变器虚拟空间矢量脉宽调制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 153-160.
JIANG Weidong, ZHAO Deyong, HU Yang, et al. Carrier-based virtual space vector pulse width modulation for diode clamped three-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 31(12): 153-160.
- [11] 蔡旭, 陈根, 周党生, 等. 海上风电变流器研究现状与展望[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 102-115.
CAI Xu, CHEN Gen, ZHOU Dangsheng, et al. Review and prospect on key technologies for offshore wind power converters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 102-115.
- [12] 阳同光, 沈兵. 模块化多电平换流器 IGBT 模块失效机理和状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 174-187.
YANG Tongguang, SHEN Bing. Review of failure mechanism and state monitoring technology for modular multilevel converter IGBT modules[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 174-187.
- [13] 关维德, 黄守道, 黄小庆. 一种基于改进模块化多电平换流器的中压风电系统及其控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3782-3791.
GUAN Weide, HUANG Shoudao, HUANG Xiaoqing. A medium-voltage wind power generation system based on improved modular multilevel converter and its control scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3782-3791.
- [14] 李欣, 姚钢, 周荔丹. MMC 风电变流器低频控制策略改进[J]. 电力电子技术, 2019, 53(7): 102-106.

- LI Xin, YAO Gang, ZHOU Lidan. Improvement of low frequency control strategy for MMC wind power converter[J]. Power Electronics, 2019, 53(7): 102-106.
- [15] 胡耀威, 周游, 程竟陵, 等. 应用于风力发电的 MMC 子模块新型电容降容控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 151-158.
- HU Yaowei, ZHOU You, CHENG Jingling, et al. Capacitance reduction control for sub-module of modular multilevel converter applied in wind power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 151-158.
- [16] 杨玉坤, 许建中. 面向大容量直驱风电机组的机侧 MMC 电容电压脉动抑制策略[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2023-03-05]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223009>.
- YANG Yukun, XU Jianzhong. Machine side MMC capacitor voltage ripple suppression strategy for high capacity direct drive wind turbines[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2023-03-05]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223009>.
- [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] 边晓燕, 田春笋, 符杨. 提升直驱型永磁风电机组故障穿越能力的改进控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 69-74.
- BIAN Xiaoyan, TIAN Chunsun, FU Yang. A coordinated control strategy for fault ride-through capacity of direct-drive permanent magnet wind power generating units[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 69-74.
- [19] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
- LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [20] 曹帅, 向往, 姚良忠, 等. 风电经混合型 MMC-HVDC 并网的交直流故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 37-43, 49.
- CAO Shuai, XIANG Wang, YAO Liangzhong, et al. AC and DC fault ride-through strategies for wind power integration via hybrid MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 37-43, 49.
- [21] 王敏, 周羽生, 杨航, 等. 基于 SMES-SFCL 直驱永磁风电并网故障穿越能力[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 138-144.
- WANG Min, ZHOU Yusheng, YANG Hang, et al. Fault ride through capability of direct drive permanent magnet wind power generation connected to grid based on SMES-SFCL[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(10): 138-144.
- [22] 杨航, 周羽生, 许振华, 等. 基于储能和序分量控制的直驱永磁风电系统非对称故障穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 60-68.
- YANG Hang, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Asymmetric fault ride-through of a direct-drive permanent magnet wind power system based on the control of energy storage and sequence components[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 60-68.
- [23] 薛易, 陈元, 郭明良, 等. 混合储能系统直驱风电机组不对称故障穿越的控制策略[J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32(1): 128-133.
- XUE Yi, CHEN Yuan, GUO Mingliang, et al. Control strategy of asymmetric fault ride-through of direct-drive wind turbines in hybrid energy storage systems[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2022, 32(1): 128-133.
- [24] TAO R, LI F, CHEN W, et al. Research on the protection coordination of permanent magnet synchronous generator based wind farms with low voltage ride through capability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 28-36.
- [25] 陶宁, 郭焱. 基于超级电容荷电状态控制功率分配的能量管理[J]. 上海电机学院学报, 2017, 20(3): 147-154, 180.
- TAO Ning, GUO Yan. Energy management based on power distribution control with supercapacitor state of charge[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2017, 20(3): 147-154, 180.
- [26] 杨琳琳. 基于超级电容储能的直驱风机故障穿越和频率调节控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- YANG Linlin. Research on fault ride through and frequency regulation of PMSG-based wind turbine generator based on the supercapacitor energy storage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-15

作者简介:

杨玉坤(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: pureyyk@163.com

许建中(1987—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统电磁暂态建模和仿真技术。E-mail: xujianzhong@ncepu.edu.cn

(编辑 许威)