

风电场低频输电系统中M3C故障穿越方法研究

董钺, 李林蔚, 李峰, 赵香花

(特变电工科技投资有限公司, 天津 301700)

摘要:风电场在送端采用低频输电,可降低线路阻抗和电缆分布电容充电电流,提升静稳极限和传输容量;在受端采用模块化多电平矩阵式变换器(M3C)变频阀并入工频电网,较之采用柔直换流阀送出一并网的方式,可省去送端换流阀,节约成本。在风电场低频输电系统中,工频电网发生故障时,系统有功功率传输能力大幅下降,低频侧电压很难瞬时响应,且风电机组存在机械惯量,因此需要在M3C变频阀低频侧投入卸荷电阻消耗风机过剩功率,同时在工频侧向故障点注入无功;低频汇流母线发生故障时,风电机组进入故障穿越模式,M3C变频阀低频侧由独立电压源模式转变为无功电流源模式,向故障点注入无功提供电压支撑。最后,在Matlab/Simulink仿真平台上,对330 MV·A风电场低频输电系统中M3C故障穿越方法的有效性进行了验证。

关键词:模块化多电平矩阵式变换器;工频故障穿越;低频故障穿越

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25957

Research of M3C Fault Ride Through Strategy in the Wind Power Low Frequency Transmission System

DONG Yue, LI Linwei, LI Feng, ZHAO Xianghua

(TBEA Science & Technology Investment Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract: Low frequency transmission was adopted in the sending end of wind power farm, in order to reduce line impedance and charging current of distributed capacitance, improve the static stability limit and transmission capacity. Compared with using flexible DC converter valves to send power and connect to grid, modular multi-level matrix converter (M3C) variable frequency valve was adopted to connect power grid in the receiving end, in order to omit the converter valve in the sending end and save cost. In the wind power low frequency transmission system, when power frequency grid fault occurred, active power transmission capability was dropped severely, the voltage of low frequency side can hardly respond instantly, and wind turbines had mechanical inertia, braking resistors in low frequency side of M3C were switched on to consume the redundant power of wind power farm, injecting reactive power to the power frequency fault point at the same time. When low frequency bus fault occurred, wind power converters ran to fault ride-through mode, low frequency side of M3C was converted to current source mode from voltage source mode, injecting the reactive power to support voltage. At last, 330 MV·A M3C model was built in Matlab/Simulink, the effectiveness of fault ride through strategy of low frequency transmission system was validated.

Key words: modular multi-level matrix converter (M3C); power frequency fault ride through; low frequency fault ride through

随着陆上风电和海上风电单机容量越来越大,风电场的规模也随之扩大,尤其是海上风电,日益向深远海发展,对风电场送出和并入工频电网的技术方案也提出了更高要求^[1-4]。常规的工频交流送出一并网的方式,受线路阻抗和电缆分

布电容充电电流影响,传输距离有限;柔性直流送出一并网的方式,具有容量大、传输距离长、调节速度快、能灵活提供电压和无功支撑、能实现多端互联等特点,但在送端需要建设海上换流站,成本高、系统结构复杂。

基金项目:华能玉环2号海上风电项目(12222420401013);2023年“天池英才”创新领军人才项目

作者简介:董钺(1981—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为电力电子技术、新能源并网和微网技术,

Email: dongyuechina@126.com

柔性低频输电技术^[5-8]将风电场输电频率降至 15~20 Hz,降低了线路阻抗和电缆分布电容充电电流,能提升传输容量和静稳极限,适合于风电这种通过变流器并网、可灵活改变送出频率(尤其是全功率风电机组)的场景。此外,尽管低频变压器、断路器、二次设备的体积和成本比工频要高,但通过变频阀将低频电能直接转换为工频后并入电网,较之通过柔直换流阀送出一并网的方案,可省去送端换流阀(对于海上风电,可省去海上换流平台),节省成本,在输电距离为 70~300 km 的范围内具有明显的经济优势^[9-10]。模块化多电平矩阵变换器(M3C)能够实现不同频率电能之间的直接交-交变换,用于低频输电系统^[11-13],除具备柔直换流阀的优点外,与两个背靠背互联的柔直换流阀相比,还具有结构更紧凑、器件数更少、具备故障自阻断功能等特点。

采用 M3C 变频阀的风电场低频输电系统结构如图 1 所示。

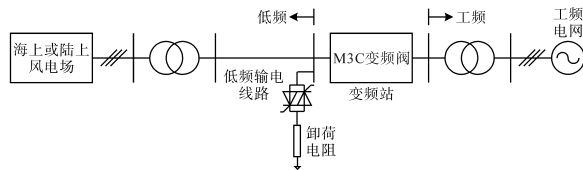


图1 采用M3C的风电场低频输电系统

Fig.1 Wind power low frequency transmission system based on M3C

图1所示系统在正常运行情况下,M3C工频侧做并网电流源运行,低频侧做电压源运行,为低频风电机组提供电压基准。当工频电网发生故障时,有功功率的传输能力大幅下降,低频侧电压很难做出瞬时响应,同时低频风电机组存在机械惯性,电能继续输入造成子模块电容电压升高。文献[14]提出,在工频侧故障时,同步降低低频侧电压或提高低频侧频率,使风电机组进入故障穿越或限功率模式,限制风电场注入M3C变频阀的功率。由于低频侧电压或频率存在响应时间,仍然需要在M3C低频侧或子模块直流侧加入卸荷电阻^[15],消耗工频故障时低频侧输入的过剩功率。

当低频侧汇流母线发生故障时,风电机组自动进入故障穿越模式,通过自身的卸荷电阻来消耗过剩的功率。此时M3C低频侧可仍工作在电压、电流双闭环模式下,只是此时电压环饱和,电流给定为限幅值;也可切换至单电流环模式,向故障点注入无功电流。

本文提出一种M3C变频器故障穿越方法,在低频侧设置通过晶闸管分组投切的卸荷电阻,在工频侧电网发生故障时,根据故障时刻M3C工频侧和低频侧的功率差值,分组投入卸荷电阻,保证各子模块不过压;故障恢复后切除卸荷电阻。在低频侧汇流母线发生故障时,M3C低频侧切换为单电流环,向故障点注入无功;故障恢复后,以故障恢复时的电压相位为初始相位,恢复电压、电流双闭环控制,避免相位突变引起的冲击电流。最后,在Matlab/Simulink仿真平台上,对330 MV·A低频输电系统中M3C故障穿越方法的有效性进行了验证。

1 M3C控制的基本控制方法

M3C的拓扑结构如图2所示。图2中, $x=u, v, w$ 代表工频侧; $y=a, b, c$ 代表低频侧; j 表示同一桥臂内的子模块序号。在风电场低频输电系统中,M3C低频侧需要为风电机组并网变流器提供电压支撑,并作为电压源运行,因此在低频出口处并联RC滤波支路;工频侧作为并网电流源并入工频电网。

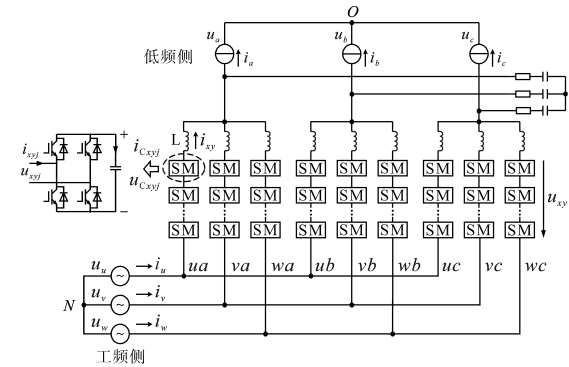


图2 M3C的拓扑结构

Fig.2 Topology of M3C

M3C通常对9个桥臂电流分别在工频和低频相角下 $dq-\alpha\beta$ 变换,对9个桥臂子模块电压做双 $\alpha\beta$ 变换,实现工频侧和低频侧的解耦。工频侧采用子模块电容电压平均值-无功功率控制,低频侧采用交流输出电压控制。控制结构如图3所示。

图3中, U_{0ref} 为子模块电压给定值, U_{00} 为各子模块电压平均值, Q_{ref} 为工频侧无功功率给定值, Q 为工频侧无功功率实际值, i_{d0s} 为桥臂电流工频零序 d 轴分量, i_{q0s} 为桥臂电流工频零序 q 轴分量, u_{sd} 为工频电网电压 d 轴分量, u_{sq} 为工频电网电压 q 轴分量, u_{s0dc} 为工频调制电压 d 轴分量, u_{s0qc} 为工频调制电压 q 轴分量; E_{dref} 为低频电压给定 d 轴分

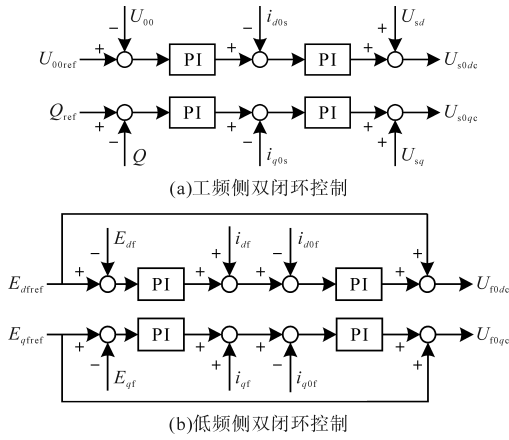


图3 M3C工频侧和低频侧控制结构图

Fig.3 Control configuration of M3C power frequency side and low frequency side

量, E_{qref} 为低频电压给定 q 轴分量, E_{df} 为低频电压实际值 d 轴分量, E_{qt} 为低频电压实际值 q 轴分量, i_{d0f} 为桥臂电流低频零序 d 轴分量, i_{q0f} 为桥臂电流低频零序 q 轴分量, i_{df} 为低频母线电流 d 轴分量, i_{qt} 为低频母线电流 q 轴分量, u_{f0dc} 为低频调制电压 d 轴分量, u_{f0gc} 为低频调制电压 q 轴分量。上述各变量均为标么值。

此外,还要对各子模块电容电压进行分层均衡控制。

M3C 通常是从工频侧启动,经过电阻软启、不控整流充电、子模块软旁路充电、脉冲解锁可控充电的过程,使子模块电压达到额定值。在风电机组采用构网型控制且配置独立 UPS 的情况下,低频侧汇流母线也具备黑启动能力,此时, M3C 也能从低频侧经上述过程启动。

2 工频故障时 M3C 控制策略

在风电场低频输电系统中,当工频电网发生故障时,采用同步降低低频侧电压,使风电机组进入故障穿越状态;或者同步升高低频侧频率,使风电机组进入过频减载模式;或者通过风机变桨机构减小风机输入功率等方法,都能实现消除风机过剩功率的目的,但上述方法都需要响应时间,不可避免地造成 M3C 子模块电压升高。为保证各子模块不过压,需要在低频侧或子模块内投入卸荷电阻。在子模块电容上并联卸荷电阻,需要加入额外的功率器件、驱动电源、控制接口和散热装置,对子模块结构改动较大,因此本文采用在低频侧通过晶闸管分组投切卸荷电阻的方法。

卸荷电阻分组数量越多,功率控制精度越高,但成本和占地面积也会越高。本文以玉环 2

号海上低频风电场 300 MW/64 kV 的 M3C 换流阀为例进行参数设计和仿真,参照此前杭州低频输电工程(300 MW 变频站配 4 组卸荷电阻)和张北四端柔直电网(康保站 1 500 MW 配 4 组卸荷电阻,张北站 3 000 MW 配 8 组卸荷电阻)^[16]的卸荷电阻配置,综合考虑控制精度和成本,卸荷电阻配置为 4 组,每组三相角接,每组每相电阻阻值为 160 Ω 、功率为 25.6 MW(三相总功率为 307 MW)。按风电并网标准^[17],单组卸荷电阻最长投入时间为 2 s,为优化电阻发热量,可使各组电阻之间进行轮换,每组电阻最长投入时间为 500 ms、发热量约为 12.8 MJ。

卸荷电阻为分组投切,故障时卸荷电阻消耗的功率需不小于故障发生瞬间低频侧和工频侧有功功率之差。因此,在判断卸荷电阻投切组数时,加入故障时刻低频侧和工频侧功率之差的锁存环节和向上取整环节,当子模块电压平均值大于 1.15(标么值)时将卸荷电阻投入。另外,考虑卸荷电阻的散热要求,在故障穿越期间每组卸荷电阻只投切 1 次(技术规范要求卸荷电阻投入的时间间隔不小于 20 min)。卸荷电阻控制结构如图 4 所示。

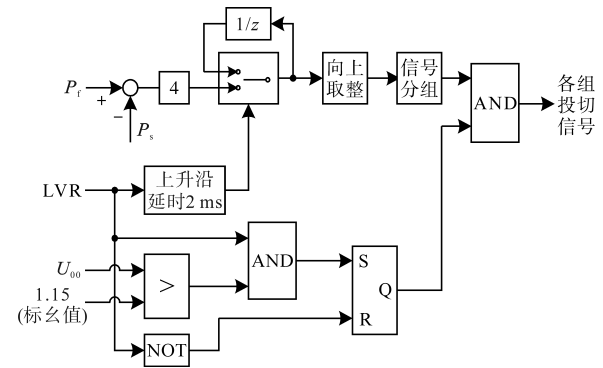


图4 卸荷电阻投切控制结构

Fig.4 Switch control configuration of braking resistors

图 4 中, P_f 为低频侧功率, P_s 为工频侧功率, 上述变量均为标么值; LVR 为工频电网故障信号。

此外,根据风电并网标准^[17],按工频电网电压跌落深度向电网提供相应的感性无功支撑。M3C 工频侧的控制结构中,子模块平均值电压控制保持不变,无功功率—电流双闭环控制切换为单无功电流控制;同时,当工频侧出现单相或两相故障时,还要向工频电网注入负序容性无功,抑制负序电压。

工频故障穿越时工频侧控制结构如图 5 所示。图中, U_{mp} 为工频电网电压正序分量幅值, U_{mn}

为工频电网电压负序分量幅值, U_{sdn} 为工频电网电压负序 d 轴分量, U_{sqn} 为工频电网电压负序 q 轴分量, i_{d0sn} 为工频网侧电流负序 d 轴分量, i_{q0sn} 为工频网侧电流负序 q 轴分量, U_{s0dcn} 为工频调制电压负序 d 轴分量, U_{s0qcn} 为工频调制电压负序 q 轴分量; K_2 为负序无功电流增益, 不小于 1。上述各变量均为标么值。

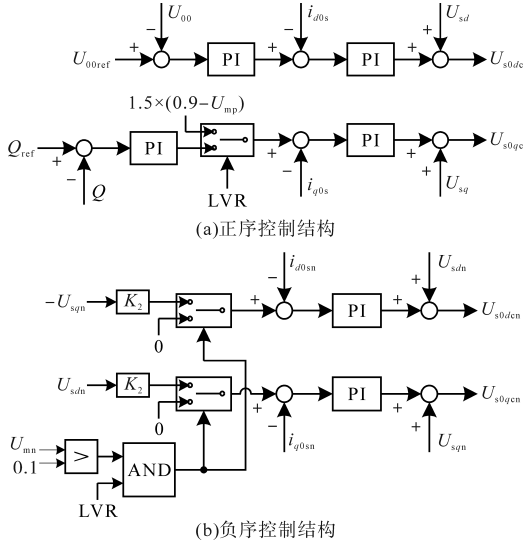


图5 工频故障穿越时工频侧控制结构

Fig.5 Control configuration of power frequency side when power frequency fault ride through

3 低频故障时 M3C 控制策略

在风电场低频输电系统中, M3C 低频侧做电压源运行, 是低频系统中唯一的电压源。当低频汇流母线发生故障时, 故障判断方式与并网电流源有所不同, 需要根据低频侧电压、电流进行综合判断, 具体结构如图 6 所示。图中, E_{dfn} 为低频电压实际值负序分量的 d 轴分量, E_{qfn} 为低频电压实际值负序分量的 q 轴分量, e_1 和 e_2 为低频电压给定值与实际值偏差的判断阈值, u_1 和 u_2 为低频正序电压实际值的判断阈值, i_1 和 i_2 为低频电流实际值的判断阈值, u_{n1} 和 u_{n2} 为低频负序电压实际值的判断阈值, 上述各变量均为标么值; LVRf 为低频汇流母线故障信号。

风电机组自动进入故障穿越模式, 向故障点注入无功, 且投入自身的卸荷电阻, 此时 M3C 低频侧卸荷电阻不动作。由于 M3C 为低频汇流母线提供基准电压源, 为保证对故障点的电压支撑能力, M3C 低频侧也同时向故障点注入无功。

通常情况下, M3C 低频侧为电压、电流双闭环结构, 一般是 d 轴电压环给定为额定值, q 轴电

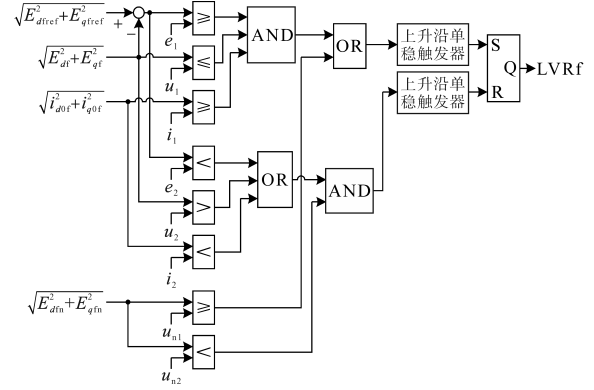


图6 低频侧故障判断结构

Fig.6 Fault judge configuration of low frequency side

压环给定为零。故障发生后, 若保持电压、电流双闭环结构, d 轴和 q 轴电压环饱和, d 轴有功电流、 q 轴无功电流给定值都达到限幅值。为最大限度地利用 M3C 的过流能力, 将控制结构切换为单无功电流环, 在电压跌落程度较深时, 最大限度对故障点提供无功和电压支撑。电压、电流给定信号的控制结构如图 7 所示。图中, E_{tabc} 为低频电压交流瞬时值, E_{dfref0} 为正常运行时低频电压给定值 d 轴分量, E_{qfref0} 为正常运行时低频电压给定值 q 轴分量, $i_{d0fref0}$ 为正常运行时低频电流给定值 d 轴分量, $i_{q0fref0}$ 为正常运行时低频电流给定值 q 轴分量, 上述各变量均为标么值; K_1 为无功电流增益, 不小于 1.5。

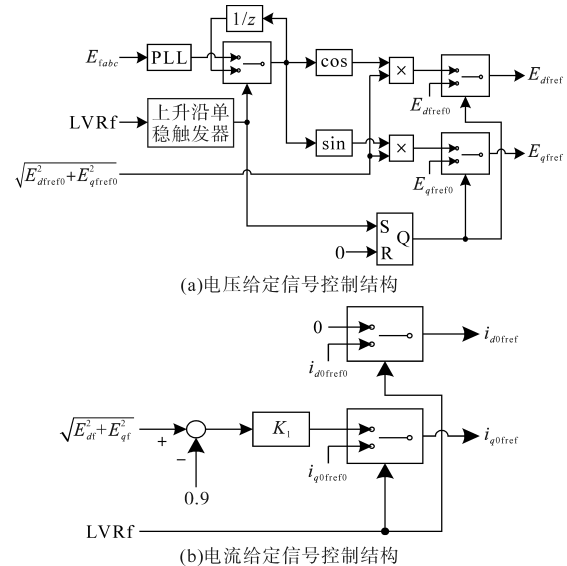


图7 低频故障穿越时低频侧电压电流给定信号控制结构

Fig.7 Voltage and current reference control configuration of low frequency side when low frequency fault ride through

采用上述控制方法进行低频侧故障穿越的等效电路如图 8 所示。图中, U_w 和 i_w 为风电场并网电压相量和并网电流相量, Z_1 为 M3C 低频输

出端到故障点的线路阻抗, Z_2 为风电场并网点到故障点的线路阻抗, Z 为故障点处的接地阻抗。

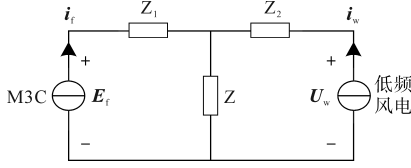


图8 低频侧故障穿越时的等效电路

Fig.8 Equivalent circuit when low frequency side fault ride through

由于M3C是低频侧唯一的电压源,将其低频侧输出电压定为电压基准 $E_f \angle 0^\circ$,风电场并网点电压为 $U_w \angle \theta_w$ 。在三相对称故障穿越期间,M3C和风电机组输出特性如下式所示:

$$\begin{cases} i_f = -j1.5 \times (0.9 - E_f) \\ i_w = 1.5 \times (0.9 - U_w) \angle (\theta_w - 90^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

假定线路阻抗和故障点对地阻抗皆为感性,即 $Z_1 \approx j\omega L_1$, $Z_2 \approx j\omega L_2$, $Z \approx j\omega L$ (ω_f 为低频角频率; L_1 , L_2 , L 分别 M3C 低频输出端到故障点、风电场并网点到故障点、故障点对地的线路等效电感)。根据图8的等效电路和式(1)的输出特性,可得故障穿越期间 M3C 低频侧输出电压、电流如下式:

$$\begin{cases} |E_f| \approx \frac{1.35\omega_f[2L + L_1 + 1.5\omega_f(L_1L_2 + LL_1 + LL_2)]}{1 + 1.5\omega_f(2L + L_1 + L_2) + 2.25\omega_f^2(L_1L_2 + LL_1 + LL_2)} \\ |i_f| \approx \frac{1.35 + 2.025\omega_fL_2}{1 + 1.5\omega_f(2L + L_1 + L_2) + 2.25\omega_f^2(L_1L_2 + LL_1 + LL_2)} \end{cases} \quad (2)$$

由于低频侧在正常运行时有负序电压、电流双闭环,电压给定为零。当低频侧发生不对称故障时,由于负序电压的存在且低频系统短路容量较大,负序电压环饱和、电流环给定为限幅值,最大限度抑制了低频侧的负序电压分量。考虑到负序分量最大的极端情况为单相对地故障和两相对地故障,此时负序电压分量幅值最大为0.33(标幺值)。按并网标准^[17],故障穿越期间输出的负序容性无功电流也为0.33(标幺值)即可。另外,再综合考虑M3C低频侧正负序电流同时输出时的最大过流能力,将负序电流限幅值设为0.33(标幺值)。

低频侧负序控制结构如图9所示。图中, i_{d0fn} 为M3C低频电流实际值负序分量的 d 轴分量, i_{q0fn} 为M3C低频电流实际值负序分量的 q 轴分量, u_{f0dcn} 为低频调制电压负序分量的 d 轴分量, u_{f0qcn} 为低频调制电压负序分量 q 轴分量, E_{dfn0} 为低频电压实际值经负序变换后的 d 轴分量, E_{qfn0} 为低频电压

实际值经负序变换后的 q 轴分量, i_{d0fn0} 为M3C低频电流实际值经负序变换后的 d 轴分量, i_{q0fn0} 为M3C低频电流实际值经负序变换后的 q 轴分量,上述各变量均为标幺值; k 为带宽增益。

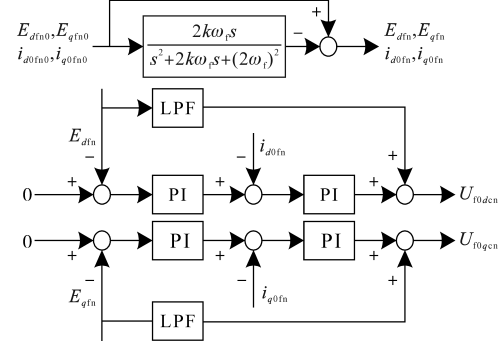


图9 低频侧负序控制结构

Fig.9 Negative sequence control configuration of low frequency side

低频侧发生不对称故障时,正序、负序等效电路与图8相同,在负序坐标系下仍将M3C低频侧负序电压定为电压基准 $E_{fn} \angle 0^\circ$,风电场并网点负序电压为 $U_{wn} \angle \theta_{wn}$ 。由于负序回路存在给定为零的电压环且电压环饱和,则M3C和风电机组的负序输出特性如下式所示:

$$\begin{cases} i_{fn} = \frac{1}{3} \angle \theta_{fn} \\ i_{wn} = U_{wn} \angle (\theta_{wn} + 90^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $1/3$ 为负序电流限幅值的标幺值; θ_{fn} 为M3C低频侧电流相位。

根据图8的等效电路和式(3)的输出特性,可得不对称故障穿越期间M3C输出电压:

$$|E_{fn}| = \frac{1}{3} \left(\omega_f L + \omega_f L_1 + \frac{\omega_f^2 L^2}{1 - \omega_f L - \omega_f L_2} \right) \quad (4)$$

4 仿真验证与结论

M3C变频阀各参数如表1所示。

表1 M3C各参数

Tab.1 All parameters of M3C

参数名称	数值	参数名称	数值
额定容量	330 MV·A	模块电容电压	2.15 kV
工频额定电压	64 kV	桥臂子模块数+冗余	56+6
工频额定频率	50 Hz	子模块电容	15 mF
低频额定电压	64 kV	桥臂电感	15 mH
低频额定频率	20 Hz	低频滤波电容	200 μ F
功率因数	-0.9~0.9	—	—

图10为M3C仿真系统示意图。图中,M3C低频侧和工频侧分别通过64 kV/230 kV变压器接入低频和工频电网;低频侧采用300 MW受控并网电流源模拟风电的电能输入,1140 V/66 kV变

压器为各风电变流器的塔筒变或机舱变,66 kV/230 kV 变压器为送端汇流母线升压变;在低频和工频 230 kV 侧用电抗分压模拟低电压故障。

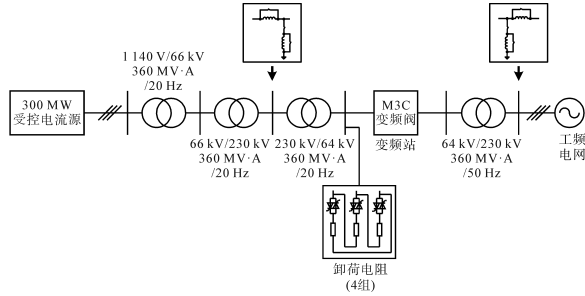


图 10 M3C 仿真系统示意图

Fig.10 M3C simulation system diagram

4.1 工频故障穿越

工频 230 kV 侧电网在 1 s—2 s 期间发生三相对称故障(故障前低频侧为额定功率输入),电压跌落至 0.1(标么值)的工频电网电压、电流和各桥臂子模块电压仿真波形如图 11 所示,低频侧电流和卸荷电流、工频 d 轴、 q 轴电流仿真波形如图 12 所示。

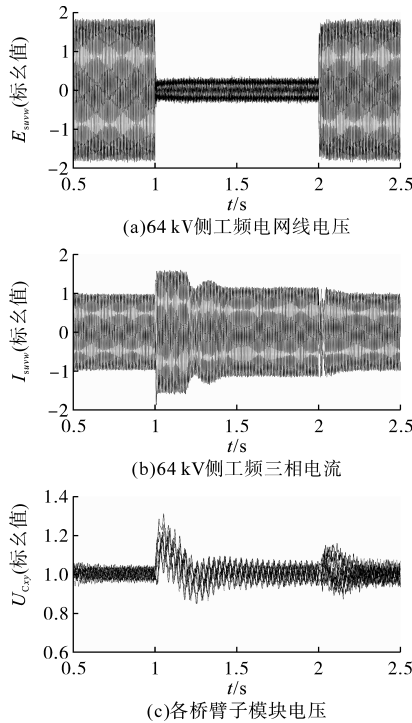


图 11 工频侧三相故障穿越时 M3C 工频电网电压、电流和各桥臂子模块电压仿真波形

Fig.11 Power grid voltage, current and arm module voltage simulation waves of M3C when 3-phase fault ride through of power frequency side

由图 11 和图 12 可见,工频电网发生三相故障后,M3C 工频侧输出功率受限,各子模块电压平均值 U_{00} 上升,升至 1.15(标么值)时,4 组卸荷

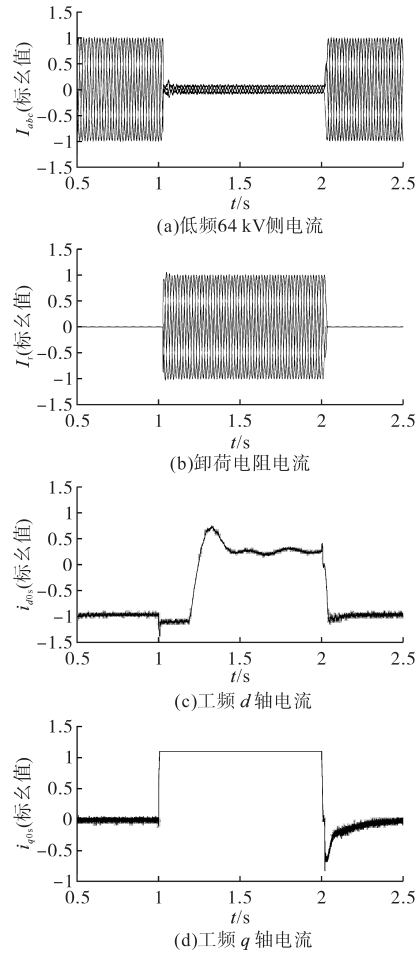


图 12 工频侧三相故障穿越时 M3C 低频侧电流和卸荷电阻电流、工频 d 、 q 轴电流仿真波形

Fig.12 Low frequency side current and chopper current, power grid d -axis current, q -axis current simulation waves of M3C when 3-phase fault ride through of power frequency side

电阻全部投入(卸荷电阻电流峰值达到 1(标么值)),在此过程中工频侧子模块电压环饱和,工频 d 轴电流达到负限幅值,M3C 向工频电网仍会输出 0.1(标么值)左右的有功功率;卸荷电阻投入后,低频侧风电全部功率都消耗在卸荷电阻上,输入 M3C 低频侧的功率为零, U_{00} 下降,降至 1(标么值)后子模块电压环退饱和,为维持子模块电压稳定,工频 d 轴电流变为 0.25(标么值)左右,从工频电网侧吸收有功功率 0.025(标么值)(卸荷电阻全部投入消耗的有功功率为 307 MW,与 M3C 额定功率 300 MW 之差的标么值约为 0.023 3(标么值),与仿真结果基本吻合);按并网标准^[17],工频无功电流幅值为 $1.5 \times (0.9 - 0.1) = 1.2$ (标么值),达到工频电流限幅值,因此工频 q 轴电流被限定于正限幅值,对应输出感性无功最大值。

工频 230 kV 侧在 1 s—2 s 之间发生 u 相电网

单相对地故障(故障前低频侧为额定功率输入),电压跌落至0.1(标么值)的工频电网电压、电流和各桥臂子模块电压仿真波形如图13所示,低频侧电流和卸荷电阻电流仿真波形如图14所示,工频正序 d 轴电流、 q 轴电流和工频负序 d 轴电流、 q 轴电流仿真波形如图15所示。

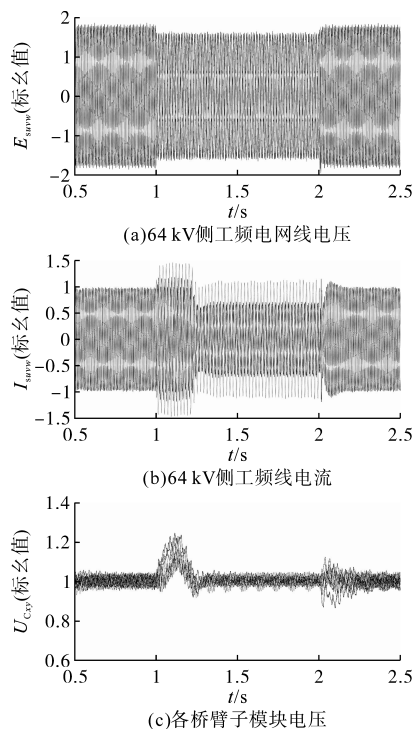


图13 工频侧单相故障穿越时M3C工频电网电压、电流和各桥臂子模块电压仿真波形

Fig.13 Power grid voltage, current and arm module voltage simulation waves of M3C when single phase fault ride through of power frequency side

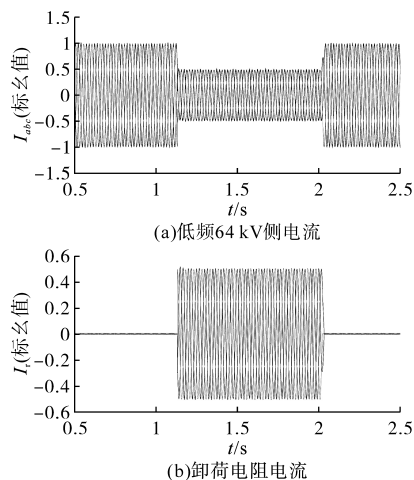


图14 工频侧单相故障穿越时M3C低频侧电流和卸荷电阻电流

Fig.14 Low frequency side current and chopper current simulation waves of M3C when single phase fault ride through of power frequency side

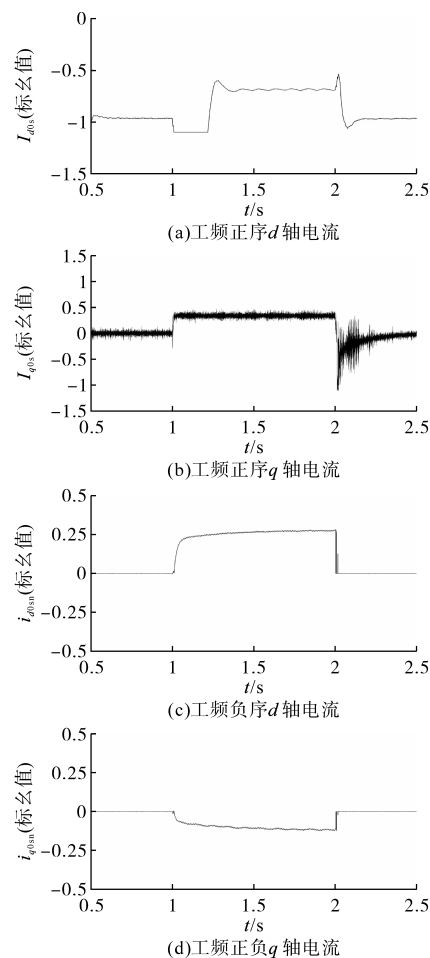


图15 工频侧单相故障穿越时M3C工频正序 d 、 q 轴电流、工频负序 d 、 q 轴电流仿真波形

Fig.15 Power grid P-sequence d -axis and q -axis current, N-sequence d -axis and q -axis current simulation waves of M3C when single phase fault ride through of power frequency side

工频电网发生单相故障时,电网正序电压分量约为0.7(标么值)(负序电压分量约为0.3(标么值)、零序电压分量约为0.3(标么值),工频变压器64 kV侧副边为角接,零序电压加在原边中性点处,副边无零序电压)。由图13~图15可见, U_{00} 上升,子模块电压环饱和,工频正序 d 轴电流(有功分量)达到负限幅值,因此向工频电网输出的有功功率约为0.7(标么值); U_{00} 升至1.15(标么值)后,卸荷电阻投入2组(卸荷电阻电流为0.5(标么值)),低频侧风电约有0.5(标么值)有功功率输入M3C,造成 U_{00} 下降,降至1(标么值)后子模块电压环退饱和,工频正序 d 轴电流从负限幅值调整为-0.7(标么值)左右,即M3C向工频电网输出0.5(标么值)左右的有功功率,子模块电压达到稳定;按并网标准^[17],工频正序无功电流幅值约为 $1.5 \times (0.9 - 0.7) = 0.3$ (标么值),负序无功电流

幅值约为 0.3(标么值),与仿真波形基本吻合。

4.2 低频故障穿越

低频 230 kV 侧在 1 s—2 s 期间发生三相对称故障(故障前低频侧为额定功率输入),电压跌落至 0.1(标么值)时 M3C 的低频电压、低频电流、桥臂子模块电压、工频电流仿真波形如图 16 所示,低频 d 、 q 轴电流仿真波形如图 17 所示。

由图 16 和图 17 可见,在低压侧三相故障穿越期间,M3C 低频侧 d 轴电流为零, q 轴电流为最大负限幅值(滞后于 d 轴 90° ,对应于输出最大感性无功),工频侧电流也随之降为零;低频侧电压其实取决于 M3C 低频侧无功电流和风机变流器无功电流在故障点对地阻抗上的压降;各桥臂子模块电压维持均衡。

由于 M3C 是低频侧唯一的电压源,且低频 64 kV 侧中性点不接地,故无论 230 kV 侧或 64 kV

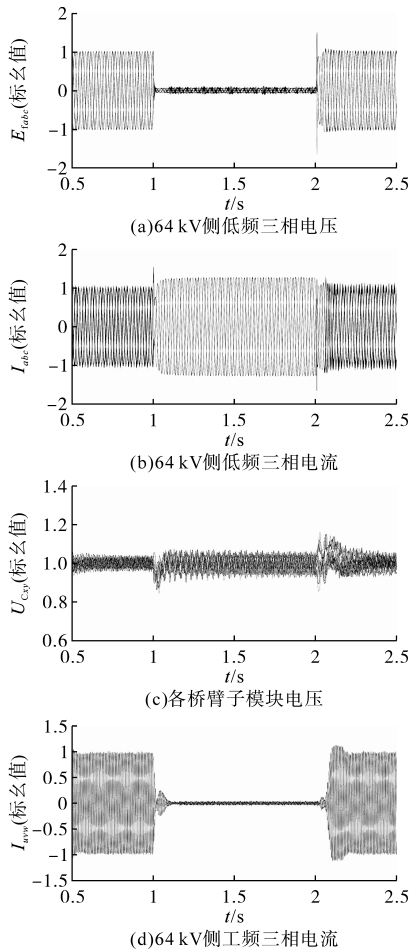


图 16 低频侧三相故障穿越时 M3C 低频电压、低频电流、桥臂子模块电压、工频电流仿真波形

Fig.16 Low frequency voltage, low frequency current, arm module voltage, power frequency current simulation waves of M3C when 3-phase fault ride through of low frequency side

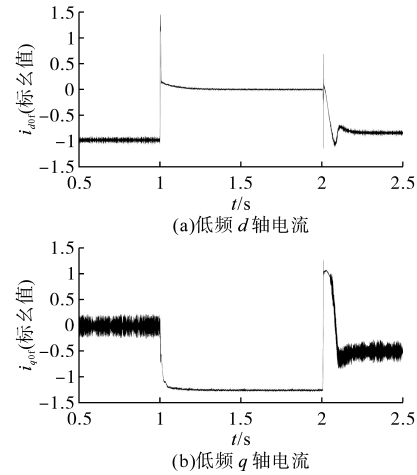


图 17 低频侧三相故障穿越时 M3C 低频 d 、 q 轴电流仿真波形

Fig.17 Low frequency d -axis and q -axis current simulation waves of M3C when 3-phase fault ride through low frequency side

侧发生单相对地故障,都不会对 M3C 低频 64 kV 侧线电压造成影响。因此,考虑低频 230 kV 侧发生两相对地故障的情况,验证不对称故障的穿越策略。低频 230 kV 侧在 1 s—2 s 期间发生 U 、 V 两相对地故障(故障前低频侧为额定功率输入),电压跌落至 0.1(标么值)时 M3C 的低频电压、低频电流、桥臂子模块电压、工频电流仿真波形如图 18 所示,低频正序 d 轴电流、正序 q 轴电流仿真波形如图 19 所示,低频负序 d 轴电流、负序 q 轴电流、负序 d 轴电压、负序 q 轴电压仿真波形如图 20 所示。

由图 18~图 20 可见,发生低频 230 kV 侧两相对地故障后,M3C 低频侧正序 d 轴电流为零、 q 轴电流为负,即向故障点注入正序感性无功电流;低频侧负序电流与负序电压近似相差 180° 电角度,负序电压环确实处于饱和状态;工频侧电流为零;同时,各子模块电压保持均衡。

本文对风电场低频输电系统中的 M3C 故障穿越方法进行研究,在工频侧电网发生故障时,在低频侧设置晶闸管分组投切的角接卸荷电阻,根据故障时刻 M3C 工频侧和低频侧的功率差值和各子模块电压平均值,分组投入卸荷电阻,保证各子模块不过压。在低频侧汇流母线发生故障时,M3C 低频侧切换为单电流环,向故障点最大限度注入无功;故障恢复后,以故障恢复时的电压相位为初始相位,恢复电压、电流双闭环控制,避免相位突变引起冲击电流。最后,在 Matlab/Simulink 仿真平台上,以 $330 \text{ MV} \cdot \text{A}/64 \text{ kV}$ 工程样机为例,对低频输电系统中 M3C 故障穿越方法的有效性进行了验证。

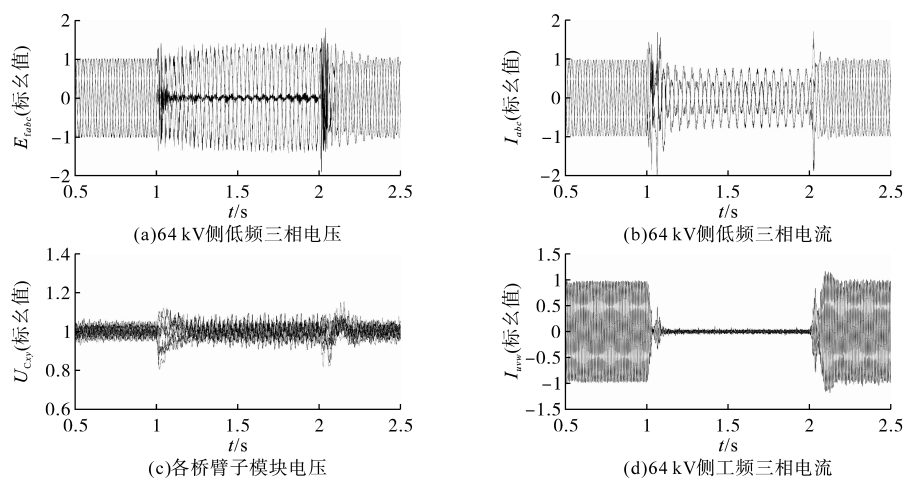
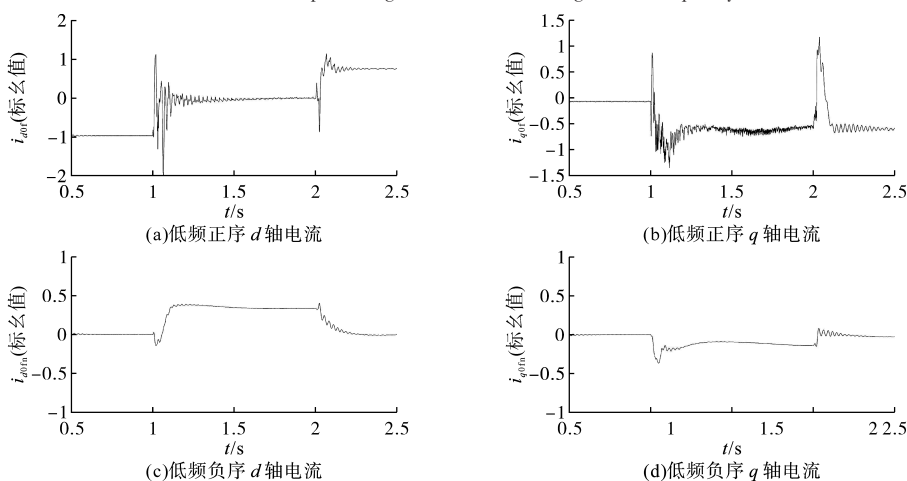
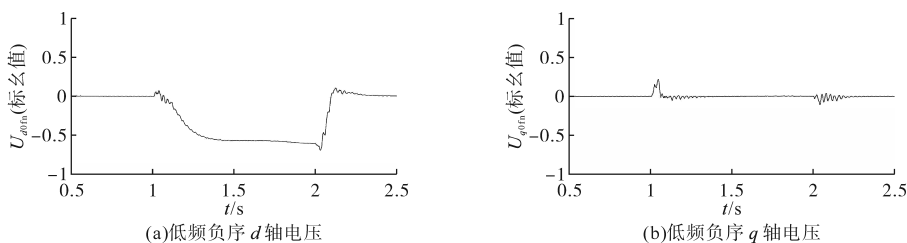


图18 低频侧两相对地故障穿越时M3C低频电压、低频电流、桥臂子模块电压、工频电流仿真波形

Fig.18 Low frequency voltage, current, arm module voltage, power frequency current simulation waves of M3C when 2-phase to ground fault ride through of low frequency side

图19 低频侧两相对地故障穿越时M3C低频正序 d, q 轴电流、低频负序 d, q 轴电流仿真波形Fig.19 Low frequency P-sequence d -axis and q -axis current, low frequency N-sequence d -axis and q -axis current simulation waves of M3C when 2-phase to ground fault ride through of low frequency side图20 低频侧两相对地故障穿越时M3C低频负序 d 轴电压、 q 轴电压仿真波形Fig.20 Low frequency N-sequence d -axis and q -axis voltage simulation waves of M3C when 2-phase to ground fault ride through

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] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提

升关键技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3691-3703.

LUO Kui, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3691-3703.

- [3] 樊肖杰, 迟永宁, 马士聪, 等. 大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2859-2870.

FAN Xiaojie, CHI Yongning, MA Shicong, et al. Research and

- application of key technologies and technical standards for large-scale offshore wind farms connecting to power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2859–2870.
- [4] 宋延涛, 范雪峰, 吴庆范, 等. 基于 MMC 的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 63–74.
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 63–74.
- [5] 陆振刚, 谢立军, 赵国亮, 等. 海上低频柔性低频送出系统无功电压协调控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3708–3718.
LU Zhengang, XIE Lijun, ZHAO Guoliang, et al. Coordinated reactive power-voltage control strategy of flexible low-frequency transmission system for offshore wind power integration[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3708–3718.
- [6] 赵国亮, 陈维江, 邓占锋, 等. 柔性低频交流输电关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 1–10.
ZHAO Guoliang, CHEN Weijiang, DENG Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 1–10.
- [7] 王秀丽, 段子越, 孟永庆, 等. 分频输电系统运行特性与控制策略综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3696–3707.
WANG Xiuli, DUAN Ziyue, MENG Yongqing, et al. Review on operational characteristics and control strategies of fractional frequency transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3696–3707.
- [8] 华文, 林进钊, 陆翌, 等. 柔性低频输电高频谐振风险评估及抑制方法研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(10): 87–96.
HUA Wen, LIN Jindian, LU Yi, et al. Research on a risk evaluation and suppression method for high-frequency resonance of flexible low-frequency transmission[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10): 87–96.
- [9] 黄明煌, 王秀丽, 刘沈全, 等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 167–174.
HUANG Minghuang, WANG Xiuli, LIU Shenquan, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 167–174.
- [10] ITIKI R, SANTO S G D, ITIKI C, et al. A comprehensive review and proposed architecture for offshore power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 111: 79–92.
- [11] 段子越, 孟永庆, 宋博阳, 等. 基于模块化多电平矩阵换流器的柔性低频输电系统大信号稳定性分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3745–3756.
DUAN Ziyue, MENG Yongqing, SONG Boyang, et al. Large signal stability analysis of flexible low frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3745–3756.
- [12] 陆立文, 吴小丹, 邱德锋, 等. 基于模块化多电平矩阵变换器的低频输电系统柔性启停策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 248–257.
LU Liwen, WU Xiaodan, QIU Defeng, et al. Flexible startup and shutdown strategy of low frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 248–257.
- [13] 吴小丹, 董云龙, 钱敏慧, 等. 面向分频海上风电送出的模块化多电平矩阵变换器改进 V/f 解耦控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2889–2898.
WU Xiaodan, DONG Yunlong, QIAN Minhui, et al. Improved V/f decoupling control strategy for modular multilevel matrix converter for fractional offshore wind power transmission[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2889–2898.
- [14] 赵勃扬, 王锡凡, 宁联辉, 等. 分频海上风电系统的不对称故障穿越控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4589–4600.
ZHAO Boyang, WANG Xifan, NING Lianhui, et al. Ride-through control of fractional frequency offshore wind power system during unsymmetrical grid faults[J]. Proceedings of CSEE, 2023, 43(12): 4589–4600.
- [15] 杨仁炘, 王霄鹤, 陈晴, 等. 机组协同-分布卸荷的风电场-柔直并网系统电网故障穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 103–111.
YANG Renxin, WANG Xiaohe, CHEN Qing, et al. Grid fault ride-through of flexible HVDC transmission system with wind farm integration based on coordination of wind turbines and distributed braking resistors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 103–111.
- [16] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698–3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698–3707.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T19963.1—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Technical specification for connecting wind farm to power system Part 1: On shore wind power: GB/T19963.1—2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.

收稿日期: 2024-05-23

修改稿日期: 2024-08-08