

引用格式:姜雨萌,何佩阳,黄阮明,等.基于 Lyapunov 能量函数的分频海上风电系统稳定性研究[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):140-150.

Citation: JIANG Yumeng, HE Peiyang, HUANG Ruanming, et al. Stability analysis of fractional-frequency offshore wind power system based on Lyapunov energy function[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 140-150.

基于 Lyapunov 能量函数的分频海上风电系统稳定性研究

姜雨萌¹, 何佩阳², 黄阮明¹, 谢伟¹, 钱晨¹, 赵勃扬², 孟永庆²

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 相比于工频和直流输电方式, 分频输电方式凭借其在输电损耗、建设成本等方面的优势, 成为大规模远距离海上风电汇集送出的重要解决方案。但是, 分频海上风电系统的稳定性研究, 尤其是在系统运行典型大干扰背景下的分析较为欠缺。通过建立分频海上风电系统高阶非线性的状态空间模型, 采用扇区非线性方法处理模型中的高阶非线性部分, 构建了系统的 Lyapunov 能量函数, 计算了相应的稳定区域。在此基础上, 基于 Lyapunov 稳定性定理, 分析了多种典型大扰动工况下永磁直驱风机和陆上模块化多电平矩阵式换流器(modular multilevel matrix converter, M3C)之间的交互稳定性问题, 并基于稳定区域的比较, 分析了系统主电路和控制部分参数对大干扰稳定性的影响规律, 给出了系统参数优化和稳定性提升策略。最后, 通过 MATLAB/Simulink 仿真算例对 Lyapunov 能量函数和稳定区域的正确性进行了验证。

关键词: 分频海上风电; Lyapunov 能量函数; 模块化多电平矩阵式换流器; 大干扰稳定性; 稳定区域

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.014 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2026)01-0140-11

Stability analysis of fractional-frequency offshore wind power system based on Lyapunov energy function

JIANG Yumeng¹, HE Peiyang², HUANG Ruanming¹, XIE Wei¹,
QIAN Chen¹, ZHAO Boyang², MENG Yongqing²

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The fractional-frequency transmission method has become an important solution for large-scale long-distance offshore wind power collection and transmission due to its advantages in transmission losses and construction costs compared with power frequency and direct current transmission methods. However, the stability research of fractional-frequency offshore wind power systems, especially the analysis under the background of typical large disturbances in system operation, is lacking. A high-order nonlinear state space model of the fractional-frequency offshore wind power system is proposed, and the sector-based nonlinear method is used to deal with the high-order nonlinear part of the model; the Lyapunov energy function of the system is constructed, and the corresponding stable region is calculated. On this basis, based on Lyapunov stability theorem, the interactive stability problem between the permanent magnet direct drive fan and the onshore modular multilevel matrix converter (M3C) under various typical large disturbance conditions is analyzed, and based on the comparative analysis of the stable area, the influence of the main circuit and control parameters of the system on the stability under large disturbance are given, which is helpful for system parameter optimization and stability improvement. Finally, the correctness of the Lyapunov energy function and stable region is

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(52477121); 国网上海市电力公司科技项目(SGSHJY00GPJS2400530)

通信作者: 何佩阳(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事分频输电技术及分频风电系统研究; E-mail: peiyanghe2002@163.com

verified through MATLAB/Simulink simulation examples.

Key words: fractional-frequency offshore wind power; Lyapunov energy function; M3C; stability under large disturbance; stable region

世界能源格局在化石燃料枯竭与环境污染加剧的背景下,逐步向以风电、光伏等新型清洁能源为主体的形式转型^[1-2]。我国的海上风电资源丰富,尤其在东部与南部的负荷中心附近,通过海上风电汇集送出,成为缓解负荷中心电能压力的一种具有竞争优势的解决方案^[3-8]。

我国海上风电资源的优势区域主要集中于深远海区域,离岸较远,存在远距离大规模传输电能的难题。目前,实现远距高效电能输送的方式主要有高压交流输电(high voltage alternating current, HVAC)^[9]、柔性高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)^[10-11]以及分频输电^[12-13]3种。HVAC输电方式的输电频率为工频,在铺设较长海底电缆的情况下,随着传输容量和距离的增加会产生较大的充电电流,极大地增加了输电损耗、降低了输电效率,无法满足深远海风电的长距离外送要求。HVDC输电方式采用直接电缆输送电能,避免了充电的电流问题,相比于HVAC方式,提升了传输效率,但HVDC方案须先建设大功率海上换流站,投资维护成本较高,并且直流断路器、变压器仍存在一定的技术瓶颈,给系统的稳定性和安全性带来了挑战。

分频输电又称为低频输电,是在20世纪90年代被提出的一种新型输电方式^[14-17]。在不提高电压等级的前提下,分频输电方式通过降低输电频率来减少交流输电线路的电气距离,缓解了海底电缆的充电电流问题,降低了输电损耗,从而提高了风电外送的容量和效率。同时,分频输电方式不需要建设海上换流器站,经济性好^[18];变压器和断路器仍可采用交流方案,不存在技术瓶颈。分频海上输电方式弥补了HVAC和HVDC的不足之处,尤其适用于中、远距离和大容量的海上风电外送场景^[19-20]。

近年来,国内外学者针对分频海上风电系统,从经济成本、关键变频设备和系统稳定性分析等方面开展了相关研究^[21-25]。特别是以模块化多电平矩阵式换流器(modular multilevel matrix converter, M3C)为陆上变频器的分频海上风电系统结构成为了研究热点^[21-22]。M3C更适用于低频运行,且M3C的性能更优,由于其两侧没有功率约束,可以进行解耦独立控制,具有高电能质量、高可靠性、高可控性和易拓展性等一系列技术优势^[23]。

随着分频技术的发展,包括浙江台州在内的一系列分频海上风电系统工程正在建设之中,系统的稳定性问题也成为工程实践的焦点。但是,目前的研究大多聚焦于单个M3C变频器的小干扰稳定性,采用状态空间法和阻抗分析等方法进行分析^[25-27]。而针对系统运行过程中典型的大干扰故障,系统稳态工作点发生了变化,小干扰稳定性分析方法不再适用,需要采用Lyapunov第二法,建立系统能量函数来进行大干扰稳定性分析^[28-30]。虽然T-S模糊理论研究了分频海上输电系统的大干扰稳定性,但是忽略了直驱风机机组的动态过程^[31-33]。在微网领域,文献[34]针对系统中典型的大扰动工况,如新能源出力波动、负荷突变等,基于T-S模糊理论构建了Lyapunov函数,从而利用相关吸引域结果对不同工况下的稳定机理进行了深入研究。进一步地,文献[35]针对更加复杂的微网集群和多端柔性互联配电网的交互大干扰稳定性,采用T-S模糊理论构建方式进行了稳定边界和裕度的求解。

综合上述问题,本文针对分频海上风电系统,在系统运行中的典型大干扰工况下,基于Lyapunov能量函数,分析了永磁直驱风机和M3C换流器之间的交互动态对系统大干扰稳定性的影响,并通过能量函数结果分析了多种扰动工况下不同系统参数对稳定性的影响,得到了相应的稳定区域,最后通过仿真验证了分析结果的正确性。

1 分频海上风电系统状态空间模型

在分频海上风电系统中,海上风电场通过永磁直驱同步风力发电机组将风能转化为电能,并通过海底电缆,以工频频率三分之一的输电频率进行远距离传输,在经过陆上M3C变频站变频转化为工频后,海上风电最终汇集至工频电网。分析分频海上风电系统的大干扰稳定性,首先需要建立系统的状态空间模型。

1.1 工频部分

分频海上风电系统的工频部分包括工频电网、工频线路和M3C工频侧。基于基尔霍夫定律,分频输电系统拓扑结构如图1所示。其中, L 为M3C桥臂电感; N 为桥臂中子模块数量; C_w 为永磁直驱风机母线电容; R_F 、 L_F 为风电场汇集线路等效阻抗;

R_C, L_C, C_C 分别为海底电缆等效阻抗和等效电容; U_{abc}, I_{abc} 分别为为换流器分频侧出口电压和电流; I_{Wabc} 为换流器流向风机的电流; I_{Cabc} 为滤波电容电流; U_{Wabc}, U_{Wabc} 分别为风机出口电压和风电场汇集外送电压。本文统一用下标“ d ”、“ q ”分别表示对应的有功分量和无功分量。在以 ω_H^0 为角速度的旋转坐标系中,工频电网电压 E_{uvw} 与 M3C 工频侧并网点电压 U_{uvw} 、电流 I_{uvw} 的关系式为

$$\begin{cases} E_{Hd} - U_{Hd} = R_S I_{Hd} + L_S \frac{dI_{Hd}}{dt} - \omega_H^0 L_S I_{Hq} \\ E_{Hq} - U_{Hq} = R_S I_{Hq} + L_S \frac{dI_{Hq}}{dt} + \omega_H^0 L_S I_{Hd} \end{cases} \quad (1)$$

式中, E_{Hd}, E_{Hq} 为工频电网电压均方根值; U_{Hd}, U_{Hq} 为 M3C 工频侧并网点电压; I_{Hd}, I_{Hq} 为 M3C 工频侧并网点电流; R_S, L_S 为工频线路等效阻抗; C_F 为分频侧并联电容; ω_H^0 为工频侧角速度稳态值。

在以 M3C 工频侧锁相环计算得到的角速度 ω_H 的旋转坐标系中,定义工频电网的线电压有效值为 E_H ,工频侧参考坐标系 dq 和 xy 分别以 ω_H 和 ω_H^0 为角速度逆时针旋转,其中 d 轴超前 x 轴的角度为 θ_H ,

式(1)中的工频电网电压可以表示为

$$\begin{cases} E_{Hd} = E_H \cos \theta_H \\ E_{Hq} = -E_H \sin \theta_H \end{cases} \quad (2)$$

M3C 控制部分如图 2 所示。其中, ω_L 为分频侧角速度; I_{da} 为换流器输入侧有功电流分量; I_{qa} 为换流器输入侧无功电流分量。M3C 工频侧采用了双闭环控制结构,其中电压外环分别通过对子模块平均电容电压 U_C 和其参考值 $U_{C,ref}$,以及工频侧出口线电压有效值 U_S 和其参考值 $U_{S,ref}$ 进行 PI 控制,得到电流内环中桥臂电流工频分量 I_{dqa} 的参考值。

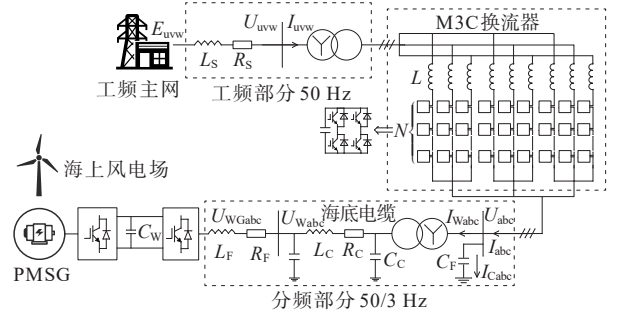


图 1 分频输电系统拓扑结构

Figure 1 Topology of fractional-frequency transmission system

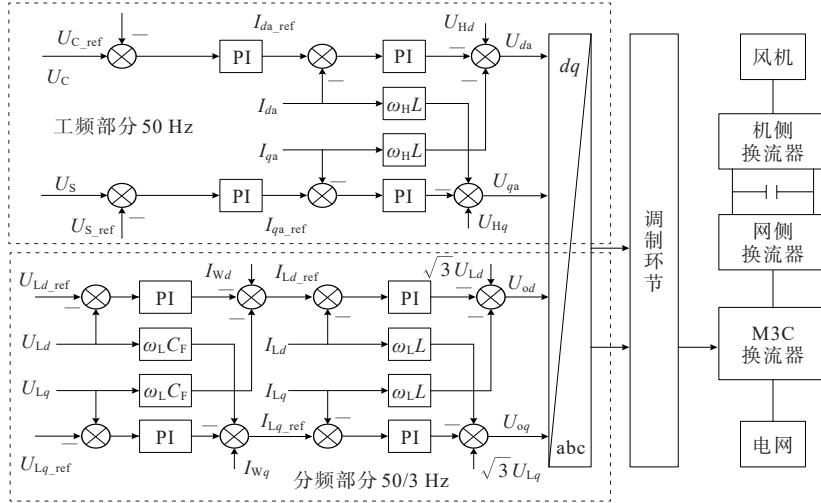


图 2 M3C 控制部分

Figure 2 Control part of M3C

由于电流内环 PI 控制器的跟踪速度相比于电压外环和锁相环要快得多,在分析系统大干扰稳定性的时候,可以忽略内环动态。综上,电压外环的表达式为

$$\begin{cases} I_{da} = K_P^{HV} (U_{C,ref} - U_C) + K_I^{HV} \int (U_{C,ref} - U_C) dt \\ I_{qa} = K_P^{HV} (U_{S,ref} - U_S) + K_I^{HV} \int (U_{S,ref} - U_S) dt \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_P^{HV}, K_I^{HV} 为 M3C 工频侧外环 PI 参数。

同理, M3C 工频侧锁相环中计算的相位角度 θ_H 和工频并网点电压之间的关系式为

$$\frac{dU_{Hq}}{dt} = (-R_S I_{Hd} - E_H \cos \theta_H + \omega_H^0 L_S I_{Hq}) (\omega_H - \omega_H^0) - L_S I_{Hd} \frac{d(\omega_H - \omega_H^0)}{dt} + L_S I_{Hq} (\omega_H - \omega_H^0)^2 \quad (4)$$

M3C 换流器承担着分频输电系统中异频能量

交互的重任。本文用 V_{xy}, i_{xy} ($x = uvw, y = a, b, c$)、 R 和 L 分别表示 M3C 换流器 9 个桥臂的电压、电流和阻抗。根据每个桥臂的公共节点和频率可以将 M3C 分为不同的子换流器。以子换流器 a 为例,其余子换流器类似,其在 $dq\omega_H^0$ 坐标中主电路部分的状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_{da}}{dt} = U_{Hd} - Ri_{da} + \omega_H^0 Li_{qa} - V_{da} \\ L \frac{di_{qa}}{dt} = U_{Hq} - Ri_{qa} - \omega_H^0 Li_{da} - V_{qa} \end{cases} \quad (5)$$

式中, R 为 M3C 桥臂电抗器等效电阻; V_{da}, V_{qa} 为 M3C 子换流器桥臂电压。在 M3C 工频端口侧,在不考虑环流谐波的情况下,当处于稳态工况或对称运行的动态工况时,3 个子换流器 a、b、c 桥臂电流的工频分量相同:

$$\begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{db} \\ i_{qb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{Hd} \\ i_{Hq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, i_{dx}, i_{qx} ($x = a, b, c$) 为 M3C 子换流器 a、b、c 桥臂电流; i_{Hd}, i_{Hq} 为 M3C 工频侧桥臂电流。

同理,在 M3C 分频端口侧可得出相似结论,即明确了分频输电系统中 M3C 工频与分频两侧端口的三相电压电流与其内部桥臂电压电流之间的关联关系。为便于统一表示,本文在建立系统状态方程时,选择以 M3C 端口电流作为状态变量。

1.2 分频部分

系统的分频部分包括 3 个部分:直驱风机的机侧和网侧换流器、海底电缆、M3C 分频侧。如图 2 所示, M3C 分频侧采用了构网型控制结构,在忽略内环动态的假设下, M3C 分频侧电压 U_{Ld}, U_{Lq} , 电流 I_{Ld}, I_{Lq} , 海底电缆等效电流 I_{Wd}, I_{Wq} 在以角速度为 ω_L 的旋转坐标系下的关系式为

$$\begin{cases} I_{Ld} = I_{Wd} + K_P^{LV} (U_{Ld,ref} - U_{Ld}) + \\ K_I^{LV} \int (U_{Ld,ref} - U_{Ld}) dt - \omega_L C_F U_{Lq} \\ I_{Lq} = I_{Wq} + K_P^{LV} (U_{Lq,ref} - U_{Lq}) + \\ K_I^{LV} \int (U_{Lq,ref} - U_{Lq}) dt + \omega_L C_F U_{Ld} \end{cases} \quad (7)$$

式中, K_P^{LV}, K_I^{LV} 为 M3C 分频侧外环 PI 参数。

在图 1 中,还可以推导出 M3C 分频出口并联电容 C_F 节点的电流关系为

$$\begin{cases} C_F \frac{dU_{Ld}}{dt} = I_{Ld} - I_{Wd} + \omega_L C_F U_{Lq} \\ C_F \frac{dU_{Lq}}{dt} = I_{Lq} - I_{Wq} - \omega_L C_F U_{Ld} \end{cases} \quad (8)$$

式中,由于海底电缆中输电频率为分频,仅为工频

的三分之一,电缆的集肤效应明显减弱,可以忽略 π 型等效电路中的并联电容效应,等效阻抗由 L_C 和 R_C 形成。海底电缆陆上端电压 U_{Ld}, U_{Lq} 和永磁直驱风机网侧换流器并网点电压 U_{Wd}, U_{Wq} 之间的关系式为

$$\begin{cases} U_{Ld} - U_{Wd} = R_C I_{Wd} + L_C \frac{dI_{Wd}}{dt} - \omega_L L_C I_{Wq} \\ U_{Lq} - U_{Wq} = R_C I_{Wq} + L_C \frac{dI_{Wq}}{dt} + \omega_L L_C I_{Wd} \end{cases} \quad (9)$$

永磁直驱风电机组采用的是背靠背变流器,该变流器由机侧换流器、直流母线和网侧换流器组成。随着海上风电技术的迭代升级,风电场装机容量和机组数量持续增长,这对建立完整风电场详细数学模型提出了更高的要求。针对这一挑战,结合特定研究场景的需求,风电场等值建模技术成为解决复杂建模问题的有效途径。当前主流方法可划分为单机等值模型和多机等值模型两类。前者通过将整个风电场等效为单台虚拟风机实现场站级动态特性模拟,具有建模复杂度低、计算效率高的优势,适用于物理条件均一的小型风电场。但对于本文研究的分频海上风电场而言,由于其机组规模庞大且控制策略差异化显著,传统单机等值模型难以准确复现其动态行为,须根据其控制策略差异及风电资源分布特征实施多机等值建模,在实现模型简化的同时确保系统动态特性的精准复现。

本文在考虑系统大干扰条件下的系统稳定性时,假设永磁直驱风电机组机侧机械部分和机侧换流器总是可以快速响应变化,忽略其动态变化。

永磁直驱风机机侧和网侧控制部分如图 3 所示。图 3 中, ψ_{wf} 为转子永磁体的磁链矢量; L_{ws} 为定子同步电感; L_F 为网侧输入交流侧滤波电感; $I_{Wsd}, I_{Wsq}, I_{Wsd,ref}, I_{Wsq,ref}$ 为机侧输入电流及对应参考值; $P_{ws}, P_{ws,ref}$ 分别为机侧输入风机有功功率及其参考值; U'_{Wsd}, U'_{Wsq} 为机侧电流内环控制器经过 PI 调节产生的电压中间控制量; $I_{Wd}, I_{Wq}, I_{Wd,ref}, I_{Wq,ref}$ 为网侧输入电流及对应参考值; U_{Wgd}, U_{Wgq} 为网侧电流内环中生成的电压信号; ω_{wl} 为永磁直驱风机的电角速度。网侧换流器控制部分的外环通过控制直流母线电压 U_{wc} 和其参考值 $U_{wc,ref}$, 得到网侧换流器并网点电流参考值 $I_{Wd,ref}$:

$$\begin{aligned} I_{Wd,ref} &= K_P^{WV} (U_{wc,ref} - U_{wc}) + \\ &K_I^{WV} \int (U_{wc,ref} - U_{wc}) dt \end{aligned} \quad (10)$$

式中, K_P^{WV}, K_I^{WV} 为风机网侧外环 PI 参数。

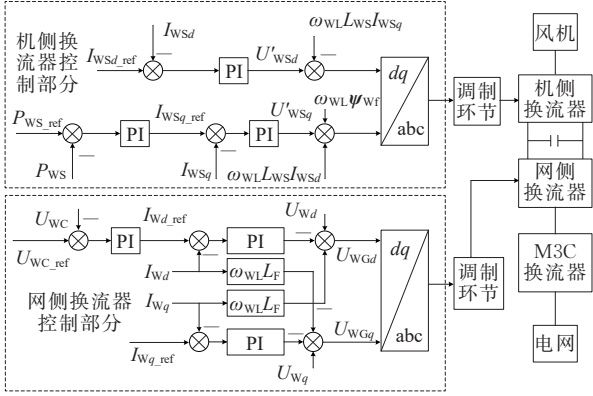


图3 永磁直驱风机机侧和网侧控制部分

Figure 3 Control part of permanent magnet direct drive fan in machine and grid sides

同理,忽略内环动态可以得到网侧换流器中锁相环部分的关系式。

1.3 系统状态空间模型

综上所述,本文定义上标“0”表示状态变量的稳态值,通过坐标平移,将系统的稳态工作点设置为坐标原点,定义分频海上风电系统的15个状态标量 $x_1 \sim x_{15}$ 为

$$\begin{cases} x_1 = I_{Hd} - I_{Hd}^0 \\ x_2 = I_{Hq} - I_{Hq}^0 \\ x_3 = \omega_H - \omega_H^0 \\ x_4 = \sin \theta_H - \sin \theta_H^0 \\ x_5 = x_{HP} - x_{HP}^0 \\ x_6 = x_{HQ} - x_{HQ}^0 \\ x_7 = U_{Ld} - U_{Ld,ref} \\ x_8 = s_{ULd} - s_{ULd}^0 \\ x_9 = U_{Lq} - U_{Lq,ref} \\ x_{10} = s_{ULq} - s_{ULq}^0 \\ x_{11} = I_{Ld} - I_{Ld}^0 \\ x_{12} = I_{Lq} - I_{Lq}^0 \\ x_{13} = I_{Wd} - I_{Wd}^0 \\ x_{14} = I_{Wq} - I_{Wq}^0 \\ x_{15} = \omega_{WL} - \omega_L \end{cases} \quad (11)$$

式中, x_{HP} 、 x_{HQ} 为M3C工频侧电压外环的积分部分;

$$\begin{aligned} & -K_1^{HPLL} \omega_H^0 L_S x_1 - K_1^{HPLL} R_S x_2 + [-K_1^{HPLL} L_S (x_1 + I_{Hd}^0) - K_P^{HPLL} R_S (x_1 + I_{Hd}^0) + K_P^{HPLL} L_S (x_2 + I_{Hq}^0)] \cdot \\ M_1 = & \frac{(x_3 + \omega_H^0) - K_P^{HPLL} L_S \omega_H^0 (x_2 + I_{Hq}^0) + K_P^{HPLL} \omega_H^0 L_S (x_2 + I_{Hq}^0) - K_P^{HPLL} E_H \sqrt{1 - x_4^2}}{1 + K_P^{HPLL} L_S (x_1 + I_{Hd}^0)} x_3 - K_1^{HPLL} E_H x_4 \end{aligned} \quad (14)$$

$$M_2 = \left[\frac{(K_P^{LV})^2}{C_F} - K_1^{LV} \right] x_7 - K_P^{LV} x_8 + \omega_L K_P^{LV} x_9 - \omega_L C_F x_{10} - \frac{R_F}{L_F} x_{13} - (x_{14} + I_{Wq}^0) x_{15} \quad (15)$$

s_{ULd} 、 s_{ULq} 为M3C分频侧电压外环的积分部分。 x_5 、 x_6 、 x_8 、 x_{10} 定义了状态变量积分形式的关系式,以 x_5 中的 x_{HP} 为例,其具体形式为

$$\begin{cases} x_{HP} = K_1^{HV} \int (U_{C,ref} - U_C) dt \\ \frac{dx_{HP}}{dt} = K_1^{HV} (U_{C,ref} - U_C) \end{cases} \quad (12)$$

最终,可以推导分频海上风电系统的状态空间模型为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -(x_2 + I_{Hd}^0) x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = (x_1 + I_{Hd}^0) x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = M_1(x_1, x_3, x_3) \\ \frac{dx_4}{dt} = \sqrt{1 - x_4^2} x_3 \\ \frac{dx_5}{dt} = \frac{K_1^{HV}}{K_P^{HV}} (x_1 - x_5) \\ \frac{dx_6}{dt} = \frac{K_1^{HV}}{K_P^{HV}} (x_2 - x_6) \\ \frac{dx_7}{dt} = -\frac{K_F^{LV}}{C_F} x_7 + x_8 \\ \frac{dx_8}{dt} = \frac{K_P^{LV}}{C_F} x_7 \\ \frac{dx_9}{dt} = -\frac{K_F^{LV}}{C_F} x_9 + x_{10} \\ \frac{dx_{10}}{dt} = \frac{K_1^{LV}}{C_F} x_9 \\ \frac{dx_{11}}{dt} = M_2(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{13}, x_{15}) \\ \frac{dx_{12}}{dt} = M_3(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{14}, x_{15}) \\ \frac{dx_{13}}{dt} = -(x_{14} + I_{Wq}^0) x_{15} - \frac{R_F}{L_F} x_{13} \\ \frac{dx_{14}}{dt} = (x_{13} + I_{Wd}^0) x_{15} - \frac{R_F}{L_F} x_{14} \\ \frac{dx_{15}}{dt} = M_4(x_9, x_{10}, x_{13}, x_{14}, x_{15}) \end{cases} \quad (13)$$

$$M_3 = -\omega_L K_P^{LV} x_7 + \omega_L C_F x_8 + \left[\frac{(K_P^{LV})^2}{C_F} - K_I^{LV} \right] x_9 - K_P^{LV} x_{10} - \frac{R_F}{L_F} x_{14} + (x_{13} + I_{Wd}^0) x_{15} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \left(K_I^{WPLL} - \frac{K_P^{LV}}{C_F} K_P^{WPLL} \right) x_9 + K_P^{WPLL} x_{10} - K_I^{WPLL} \omega_L L_C x_{13} + K_P^{WPLL} \omega_L L_C \frac{R_F}{L_F} x_{13} + \\ & K_P^{WPLL} L_C (x_{15} + \omega_L) \frac{R_F}{L_F} x_{13} - \omega_L K_P^{WPLL} L_C \frac{R_F}{L_F} x_{13} + K_P^{WPLL} \left(L_C \frac{R_F}{L_F} - R_C \right) (x_{13} + I_{Wd}^0) x_{15} - \\ & K_I^{WPLL} R_C x_{14} + K_I^{WPLL} L_C \frac{R_F}{L_F} x_{14} - K_P^{WPLL} \left(L_C \frac{R_F}{L_F} - R_C \right) \frac{R_F}{L_F} x_{14} - K_I^{WPLL} L_C (x_{13} + I_{Wd}^0) x_{15} + \\ M_4 = & \frac{K_P^{WPLL} \omega_L L_C (x_{14} + I_{Wq}^0) x_{15} + K_P^{WPLL} L_C (x_{15} + \omega_L) (x_{14} + I_{Wq}^0) x_{15} - \omega_L K_P^{WPLL} L_C (x_{14} + I_{Wq}^0) x_{15}}{1 + K_P^{WPLL} L_C (x_{13} + I_{Wd}^0)} \end{aligned} \quad (17)$$

式中, K_P^{HPLL} 、 K_I^{HPLL} 为锁相环 PI 参数。

2 Lyapunov 能量函数的构建

2.1 非线性项分析

基于式(13)的系统状态空间模型,可以得到其中包含了多组状态变量相乘形式的非线性项,定义以下形式的非线性项:

$$\begin{cases} N_1 = x_1 + I_{Hd}^0 \\ N_2 = x_2 + I_{Hq}^0 \\ N_3 = x_3 + \omega_H^0 \\ N_4 = \sqrt{1 - x_4^2} \\ N_5 = x_{13} + I_{Wd}^0 \\ N_6 = x_{14} + I_{Wq}^0 \\ N_7 = x_{15} + \omega_L \end{cases} \quad (18)$$

式中, $N_1 \sim N_7$ 为非线性项,则系统的状态空间表达式可以写为

$$\frac{dx}{dt} = A(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7) x \quad (19)$$

式中, A 可以定义为一个广义的系统矩阵; x 为包含 15 个状态标量 $x_1 \sim x_{15}$ 的列向量。

通过式(18)中非线性项的具体形式可以得到其物理意义均为状态变量与稳态工作点的偏移情况,即可以通过定义非线性项的最大和最小值来确定系统受到扰动的程度。在非线性项取值的边界处,非线性的广义系统矩阵就可以变为线性的系统矩阵。通过 7 个非线性项的组合,可以得到 128 个线性矩阵,定义其为系统的线性局部系统矩阵,具体形式为

$$\begin{cases} A_1 = A_1(N_1^{\max}, N_2^{\max}, N_3^{\max}, N_4^{\max}, N_5^{\max}, N_6^{\max}, N_7^{\max}) \\ A_2 = A_2(N_1^{\max}, N_2^{\max}, N_3^{\max}, N_4^{\max}, N_5^{\max}, N_6^{\max}, N_7^{\max}) \\ \vdots \\ A_{128} = A_{128}(N_1^{\min}, N_2^{\min}, N_3^{\min}, N_4^{\min}, N_5^{\min}, N_6^{\min}, N_7^{\min}) \end{cases} \quad (20)$$

式中, N_x^{\max} 、 N_x^{\min} ($x = 1, 2, \dots, 7$) 分别为非线性项的极大值和极小值。

本文为了分析具有高阶非线性特点的系统状态空间模型,引入扇区非线性方法。扇区非线性方法是一种处理控制系统非线性特性的有效工具,其核心思想是将非线性环节限制在由两个线性函数界定的扇区范围内,通过构建满足扇区条件的 Lyapunov 函数或波波夫判据,实现对闭环系统稳定性的严格分析。该方法通过将非线性项参数化,结合时滞补偿、积分不等式等技巧,有效处理饱和、死区、继电器特性等典型非线性问题,特别适用于电力电子装置、机器人控制等高维非线性系统的鲁棒控制器设计。在电力系统领域,扇区非线性方法常被用于分析 M3C 等电力变换装置的暂态稳定性,通过建立扇区约束下的状态方程,结合小增益定理或圆判据,系统评估控制器参数对系统性能的影响,为非线性环节的补偿设计提供理论支撑。该方法兼具数学严谨性与工程实用性,能够在保证系统稳定性的前提下,实现对复杂非线性动态行为的精确建模与控制。

在分频海上风电系统中,具体而言,以一系列线性局部系统矩阵加权求和的形式精确描述原非线性系统的广义系统矩阵,并且每个线性局部矩阵的权重与其对应的非线性项相关。基于式(18)和式(20),权重的具体形式为

$$\begin{cases} W_1 = \frac{\tau \omega_1}{\sum_{n=1}^{128} \tau \omega_n} \\ W_2 = \frac{\tau \omega_2}{\sum_{n=1}^{128} \tau \omega_n} \\ \vdots \\ W_{128} = \frac{\tau \omega_{128}}{\sum_{n=1}^{128} \tau \omega_n} \end{cases} \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_1 &= \frac{N_1 - N_1^{\max}}{N_1^{\max} - N_1^{\min}} \cdot \frac{N_2 - N_2^{\max}}{N_2^{\max} - N_2^{\min}} \cdot \frac{N_3 - N_3^{\max}}{N_3^{\max} - N_3^{\min}} \cdot \frac{N_4 - N_4^{\max}}{N_4^{\max} - N_4^{\min}} \cdot \frac{N_5 - N_5^{\max}}{N_5^{\max} - N_5^{\min}} \cdot \frac{N_6 - N_6^{\max}}{N_6^{\max} - N_6^{\min}} \cdot \frac{N_7 - N_7^{\max}}{N_7^{\max} - N_7^{\min}} \\ \omega_2 &= \frac{N_1 - N_1^{\min}}{N_1^{\max} - N_1^{\min}} \cdot \frac{N_2 - N_2^{\max}}{N_2^{\max} - N_2^{\min}} \cdot \frac{N_3 - N_3^{\max}}{N_3^{\max} - N_3^{\min}} \cdot \frac{N_4 - N_4^{\max}}{N_4^{\max} - N_4^{\min}} \cdot \frac{N_5 - N_5^{\max}}{N_5^{\max} - N_5^{\min}} \cdot \frac{N_6 - N_6^{\max}}{N_6^{\max} - N_6^{\min}} \cdot \frac{N_7 - N_7^{\max}}{N_7^{\max} - N_7^{\min}} \\ &\vdots \\ \omega_{128} &= \frac{N_1 - N_1^{\min}}{N_1^{\max} - N_1^{\min}} \cdot \frac{N_2 - N_2^{\min}}{N_2^{\max} - N_2^{\min}} \cdot \frac{N_3 - N_3^{\min}}{N_3^{\max} - N_3^{\min}} \cdot \frac{N_4 - N_4^{\min}}{N_4^{\max} - N_4^{\min}} \cdot \frac{N_5 - N_5^{\min}}{N_5^{\max} - N_5^{\min}} \cdot \frac{N_6 - N_6^{\min}}{N_6^{\max} - N_6^{\min}} \cdot \frac{N_7 - N_7^{\min}}{N_7^{\max} - N_7^{\min}} \end{aligned} \right. \quad (22)$$

综上,可以将原高阶非线性系统的状态空间表达式处理为以下线性组合的形式:

$$\frac{dx}{dt} = \sum_{n=1}^{128} W_n A_n x \quad (23)$$

2.2 能量函数的求解

定义二次型形式的能量函数 $V(x)$ 如下:

$$V(x) = x^T P x \quad (24)$$

式中, P 为一个对称正定矩阵。基于 Lyapunov 稳定性定理,能量函数 $V(x)$ 还应满足以下条件:

$$\frac{dV(x)}{dt} = \sum_{n=1}^{128} W_n x^T (A_n^T P + P A_n) x < 0 \quad (25)$$

综上,构建系统能量函数的问题,可以具体描述为寻找一个满足条件的矩阵 P 。从分析式(25)中的限制条件可以得出,这是一个典型的线性矩阵不等式组的存在性问题。为了方便求解,本文引入一个辅助凸优化问题,定义优化标量 γ ,可以通过求解如下形式的凸优化问题,来计算矩阵 P 的具体结果:

$$\left\{ \begin{aligned} \min & \gamma \\ \text{s.t.} & A_1^T P + P A_1 \leq \gamma I \\ & A_2^T P + P A_2 \leq \gamma I \\ & \vdots \\ & A_{128}^T P + P A_{128} \leq \gamma I \end{aligned} \right. \quad (26)$$

式中, I 为单位矩阵。当优化标量 γ 的最小值优化结果非负时,即表明在整个空间内没有能够满足式(25)的矩阵 P ,在对应的非线性项扰动强度条件下,系统不存在二次型的能量函数,系统大干扰不稳定。同时,可以求解系统的能量函数与对应的临界能量 V_{cr} ,绘制相应的系统稳定区域(region of attraction stability, RAS),其具体形式为

$$A_{RAS} = \{x: V(x) \leq V_{cr}\} \quad (27)$$

其中,由于系统状态空间表达式是15阶,RAS是在15维空间中的超球面,不能直观分析得出系统的大干扰稳定性,通常情况下,需要根据具体的扰动类型和参数特点,选取RAS在二维空间的投影进行分析。针对高维状态空间下的系统稳定性分析难题,研究人员通常采用二维投影方法将15阶状态方程简化为可直观观测的平面轨迹。具体策略包括:依据扰动类型(如短路故障、功率突变或谐振现象)筛选与动态响应强相关的主导变量,结合物理意义与数学特征值分解构建特征平面,通过相平面变换技术将超球面稳定域映射为椭圆区域。不同扰动类型在投影平面呈现差异化轨迹特征:对称故障表现为螺旋收敛,功率突变呈现阶跃响应,谐振现象则形成周期性振荡。通过分析轨迹形态与椭圆边界的相对关系,可有效评估系统暂态稳定性,其轨迹斜率、曲率及发散趋势分别反映系统耦合强度、阻尼特性及稳定裕度。该方法在保持理论严谨性的同时,为复杂电力电子系统的大扰动稳定性评估提供了直观的可视化分析工具。二维空间中的能量函数和RAS可以表示为

$$\left\{ \begin{aligned} V(x) &= P(i,i)x_i^2 + P(i,j)x_i x_j + P(j,j)x_j^2 \\ A_{RAS}(i,j) &= \{x: V(x) \leq V_{cr}\} \end{aligned} \right. \quad (28)$$

式中, $x_i, x_j \in x$; $P(i,j)$ 为最优解 P 中对应的元素; $A_{RAS}(i,j)$ 为系统稳定区域中对应的元素。

3 大干扰稳定性分析

3.1 能量函数求解及验证

分频海上风电系统参数如表1所示。基于表1中的数据,分频输电系统的 Lyapunov 能量函数和RAS可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} V(x) &= 201.2x_1^2 + 0.76x_1 x_3 + 131.2x_3^2 \\ A_{RAS1} &= \{x: V(x) \leq 3.24 \times 10^5\} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

式中, A_{RAS1} 为对应表1中数据的系统稳定区域。

为了验证上述求解结果的正确性,本文基于表1展示的分频海上风电系统参数,在MATLAB/Simulink中搭建如图1所示的分频海上风电系统仿真模型,并以工频侧线路阻抗 $R_s + j\omega_{H1} L_s$ 故障为例进行分析。

Lyapunov 能量函数与稳定区域验证如图4所示,以 A_{RAS1-1} 为例,其稳定区域在 x_1-x_3 平面中是中

表 1 分频海上风电系统参数

Table 1 Parameters of fractional-frequency offshore wind power system

E_H/kV	$\omega_H^0/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\omega_L^0/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	L/mH	L_S/mH	$R_S/\text{m}\Omega$	$C_F/\mu\text{F}$	L_C/mF	$R_C/\text{m}\Omega$	K_{PI}^{HV}	K_{PI}^{LV}	K_{PI}^{HPLL}	C_W/mF	K_{PI}^{WV}
220	100π	$100\pi/3$	60	8.7	170	5	30	600	2/10	20/200	0.2/20	10	0.2/2

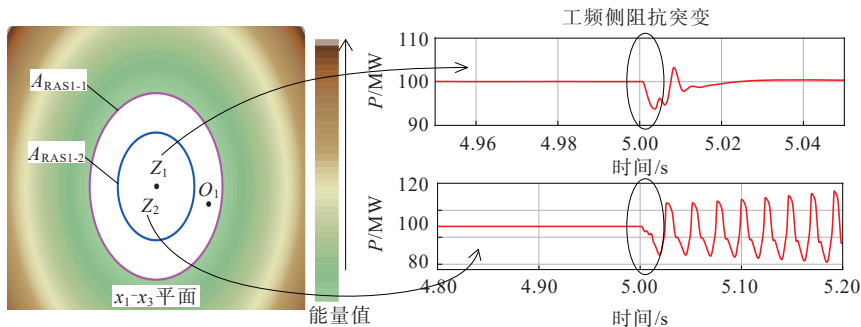


图 4 Lyapunov 能量函数与稳定区域验证

Figure 4 Lyapunov energy function and stable region verification

心为坐标原点的椭圆,中心表示终态稳定工作点,椭圆边界值为临界能量。基于 Lyapunov 稳定性定理,如果初始稳定工作点位于 A_{RAS1-1} 内部,则表明系统遭受大干扰后,经过一段时间的暂态过程,由于能量小于临界能量,最终可以恢复稳定,即完成从初始稳定工作点迁移到终态稳定工作点的过程。

在图 4 中, Z_1 、 Z_2 分别表示工频侧线路阻抗突增到 2 倍和 4 倍的情况下的终态稳定工作点, A_{RAS1-1} 和 A_{RAS1-2} 则为其对应的稳定区域, O_1 为初始稳定工作点,其中将 A_{RAS1-1} 和 A_{RAS1-2} 变换于同一坐标中心 (Z_1 、 Z_2 重合),以便比较不同状态下吸引域的相对大小。从理论上分析,由于 O_1 在 A_{RAS1-1} 的内部,但是在 A_{RAS1-2} 的外部,所以在从 O_1 到 Z_1 的过程中,系统是大干扰稳定的,而从 O_1 到 Z_2 的过程中,系统是大干扰不稳定的。本文分别在仿真中模拟上述两种情况,即在 5 s 时工频侧阻抗发生不同程度的突变, Z_1 情况下系统工频侧功率波形受到大扰动后,能够恢复稳定,而 Z_2 情况下系统工频侧功率波形在阻抗突变之后发生了振荡,系统无法过渡到新的稳定工作点。图 4 的理论分析结果和仿真实验波形对应一致,验证了 Lyapunov 能量函数计算和稳定区域求解结果的正确性。

3.2 系统参数对稳定性的影响

在分频风电系统中,永磁直驱风电机组的网侧换流器和 M3C 都是电力电子设备,通过海底电缆相连接来传输电能。在系统运行过程中,尤其是在典型的大干扰工况下,两个电力电子设备的交互影响会对系统的大干扰稳定性产生重要影响。采用基于 Lyapunov 能量函数的方法分析交互稳定性的影

响,研究不同系统参数条件下,系统大干扰稳定区域的变化情况,是揭示大干扰不稳定机理和增强系统稳定性的有效方法。系统参数对大干扰稳定性的影响,主要从主电路和控制部分两方面引入,所以下分析结果从主电路和控制部分两方面展开。

1) 主电路部分。

图 5 分别展示了在不同 M3C 桥臂阻抗 X_B 和海底电缆等效阻抗 X_C 条件下,主电路参数对系统大干扰稳定性的影响。本文以表 1 中的数据为基准值,分别考虑不同倍率基准值条件下系统 RAS 在同一平面内大小的变化,分析了主电路参数对系统大干扰稳定性的影响。图 5(a) 展示了 M3C 桥臂阻抗对系统稳定区域的影响,相比于 $1.0X_B$ 对应的稳定区域 $A_{RASB1.0}$,当系统阻抗增大为 1.2 倍的基准值时, $1.2X_B$ 对应的稳定区域 $A_{RASB1.2}$ 的面积变大,系统的大干扰稳定性在 M3C 桥臂阻抗增加之后增强。从物理意义角度分析, M3C 桥臂阻抗增大,系统整体阻尼增强,有助于暂态过程中系统由不稳定状态过渡到新的稳定状态。从理论分析角度出发,当系统状态空间模型中与桥臂阻抗 X_B 直接相关的桥臂电感 L 发生变化时,模型对应的所有局部线性系统矩阵都发生了相应的改变,通过求解凸优化问题的形式与其他因素相互耦合,很难通过一一对应的数学函数进行描述,但是从稳态区域面积变化中,可以直观地反映出最终的结果,这对于优化系统参数、解决系统的大干扰稳定性问题、保障系统的安全稳定运行有重要意义。同理,分析图 5(b) 中海底电缆等效阻抗 X_C 变化时稳定区域的变化可以得到,随着海底电缆阻抗的减小,系统大干扰稳定性明显增

强,但这是在一定的参数变化范围内成立的,超过一定范围之后,系统的稳定性反而会变差。

2) 控制部分。

图 6 展示了永磁直驱风机网侧换流器和 M3C 工频侧外环 PI 参数变化时,控制部分参数对系统大干扰稳定性的影响。通过对比分析可得,无论是 M3C 工频侧,还是网侧换流器的外环 PI 参数的增大,对于系统恢复稳定都是有益的,但是相比于 M3C,网侧换流器控制参数对于系统的影响较小。

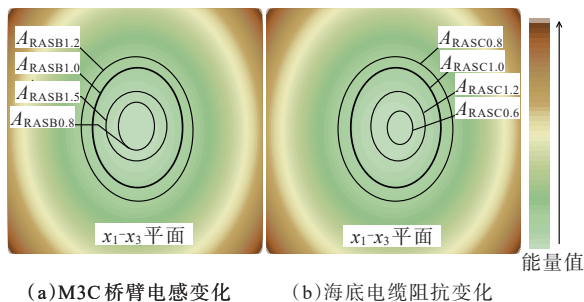


图 5 主电路参数对系统大干扰稳定性影响

Figure 5 Influence of main circuit parameters on system stability under large disturbance

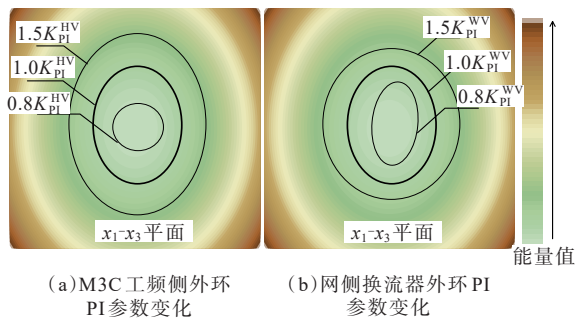


图 6 控制部分参数对系统大干扰稳定性影响

Figure 6 Influence of parameters of control part on system stability under large disturbance

4 结 语

本文通过建立高阶非线性分频输电系统的状态空间模型,采用扇区非线性的方法构建了系统的 Lyapunov 能量函数,并求解了相应的稳定区域。基于 Lyapunov 能量函数,针对系统运行过程中出现的典型的大干扰稳定性问题,包括阻抗突变、功率波动等情况,分析了系统的稳定性与稳定区域。从系统主电路和控制部分参数两个角度,全面分析了永磁直驱风机和 M3C 之间的交互动态对系统整体稳定性的影响,给出了参数影响系统稳定性的规律,有助于系统参数的优化和稳定性提升。最后,在 MATLAB/Simulink 环境中搭建的分频输电系统模

型,验证了上述方法和计算结果的有效性和正确性。

参考文献:

- [1] 张爱军,刘会强,慕腾,等. 计及经济-低碳时空匹配的高比例新能源电力系统扩展规划[J]. 智慧电力, 2024, 52(11): 72-80.
ZHANG Aijun, LIU Huiqiang, MU Teng, et al. Expansion planning for high proportion of renewable energy power system considering economy-low carbon spatiotemporal matching[J]. Smart Power, 2024, 52(11): 72-80.
- [2] 高赐威,严兴煜. 支撑分布式新能源入市的需求侧资源参与系统运行和市场交易关键技术[J]. 供用电, 2025, 42(11): 2+1.
GAO Ciwei, YAN Xingyu. Key technologies of demand-side resource participation system operation and market transaction to support distributed new energy entering the market[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(11): 2+1.
- [3] 杨国清,薛雨,姚李孝,等. 光热电站并网对新能源电网运行特性的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 134-139+146.
YANG Guoqing, XUE Yu, YAO Lixiao, et al. A study on the influence of the connected photo-thermal power station on the operation characteristics of the new energy grid[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(5): 134-139+146.
- [4] 周强,马彦宏,沈琛云,等. 新时期中国西北地区新能源可持续发展反思与建议[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 78-84.
ZHOU Qiang, MA Yanhong, SHEN Chenyun, et al. Reflection and suggestions on sustainable development of new energy in northwest China in new era[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2020, 36(6): 78-84.
- [5] 段子越,孟永庆,宁联辉,等. 柔性分频输电系统的构建规划及关键设备技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 205-215.
DUAN Ziyue, MENG Yongqing, NING Lianhui, et al. Review on construction planning and key equipment technology of flexible fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 205-215.
- [6] 徐涛,刘泽楠,鲁亚楠,等. 基于协同阻尼控制技术抑制海上风电次同步振荡[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(6): 115-123.
XU Tao, LIU Zenan, LU Yanan, et al. Subsynchronous oscillation suppression of offshore wind power based on cooperative damping control technology[J]. Power

- System and Clean Energy, 2025, 41(6): 115-123.
- [7] 张磊,姜贞强,倪佳华,等.基于二阶锥凸松弛的海上风电场内部无功优化[J].电力建设,2024,45(1): 92-101.
ZHANG Lei, JIANG Zhenqiang, NI Jiahua, et al. Internal reactive power optimization of offshore wind farms using second-order cone convex relaxation[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 92-101.
- [8] 严新荣,张宁宁,马奎超,等.我国海上风电发展现状与趋势综述[J].发电技术,2024,45(1): 1-12.
YAN Xinrong, ZHANG Ningning, MA Kuichao, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 1-12.
- [9] 韩先才,孙昕,陈海波,等.中国特高压交流输电工程技术发展综述[J].中国电机工程学报,2020,40(14): 4371-4386.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386.
- [10] 王硕,霍慧娟,徐丹,等.计及特高压交流工程建设的区域碳减排测算及分摊[J].中国电力,2024,57(7): 163-172.
WANG Shuo, HUO Huijuan, XU Dan, et al. Calculation and sharing of regional carbon emission reduction considering construction of ultra high voltage AC projects[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 163-172.
- [11] 李岩,冯俊杰,卢毓欣,等.大容量远海风电柔性直流送出关键技术及展望[J].高电压技术,2022,48(9): 3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.
- [12] 林进钿,倪晓军,裘鹏.柔性低频交流输电技术研究综述[J].浙江电力,2021,40(10): 42-50.
LIN Jindian, NI Xiaojun, QIU Peng. Review of flexible low-frequency AC transmission technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 42-50.
- [13] 张树楠,任军辉,宋志顺,等.基于M3C的柔性低频输电系统启动控制策略研究[J].高压电器,2024,60(8): 201-209.
ZHANG Shunan, REN Junhui, SONG Zhishun, et al. Research on startup control strategy of flexible low-frequency transmission system based on M3C[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 201-209.
- [14] 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.
- [15] 李猛,卫云辉,张豆豆,等.基于动态状态估计的海风柔性低频输电系统海缆纵联保护[J].电力系统保护与控制,2025,53(12): 1-12.
LI Meng, WEI Yunhui, ZHANG Doudou, et al. Pilot protection of submarine cables in flexible low frequency transmission systems for offshore wind power based on Electric Power Engineering Technology[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 1-12.
- [16] 史艳刚,朱海勇,陆立文,等.低频输电系统控制对差动保护影响及优化策略[J].电力工程技术,2025,44(3): 160-169.
SHI Yangang, ZHU Haiyong, LU Liwen, et al. Influence of low-frequency transmission system control on differential protection and optimization strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 160-169.
- [17] MENG Y Q, YAN S H, WU K, et al. Comparative economic analysis of low frequency AC transmission system for the integration of large offshore wind farms [J]. Renewable Energy, 2021, 179(C): 1955-1968.
- [18] 王锡凡,王秀丽.分频输电系统的可行性研究[J].电力系统自动化,1995,19(4): 5-13.
WANG Xifan, WANG Xiuli. Feasibility study of fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(4): 5-13.
- [19] 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 applications of flexible low-frequency AC power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 1-10.
- [20] 孙玉巍,王童,付超,等.适用于海上风电分频输电的模块化多电平矩阵变换器故障穿越控制策略[J].高电压技术,2023,49(1): 19-30.
SUN Yuwei, WANG Tong, FU Chao, et al. Fault ride-through control strategy of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 19-30.
- [21] 宁联辉,吴再驰,王锡凡,等.基于模块化多电平矩阵式换流器的分频输电系统低频侧阻抗建模及稳定性判别[J].电网技术,2022,46(10): 3720-3729.
NING Lianhui, WU Zaichi, WANG Xifan, et al. Low-frequency side impedance modeling and stability discrimination of fractional frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3720-3729.
- [22] WANG X F, WANG X L. Feasibility study of fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 962-967.
- [23] LIU S Q, WANG X F, MENG Y Q, et al. A decoupled

- control strategy of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2111-2121.
- [24] DUAN Z Y, MENG Y Q, DUAN Y K, et al. Large-signal stability analysis and enhancement of modular multilevel matrix converter under power fluctuation based on T-S fuzzy model theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14601-14613.
- [25] 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): 3741-3751.
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): 3741-3751.
- [26] 徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之一: M^3C 的数学模型与等效电路[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 13-21.
XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: part 1-mathematical model and equivalent circuit of M^3C [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 13-21.
- [27] 刘颂凯, 龚潇, 杨超, 等. 结合更新机制的电力系统暂态稳定评估研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 1-9.
LIU Songkai, GONG Xiao, YANG Chao, et al. Transient stability assessment of power system in combination with update mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 1-9.
- [28] 孙玉巍, 常静恬, 付超, 等. 分频输电系统模块化多电平矩阵变换器谐波特性分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 21-30+84.
SUN Yuwei, CHANG Jingtian, FU Chao, et al. Harmonic characteristics analysis of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 21-30+84.
- [29] 陆立文, 吴小丹, 周前, 等. 双端柔性低频输电系统无扰动并网控制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 31-39.
LU Liwen, WU Xiaodan, ZHOU Qian, et al. Undisturbed grid connection control strategy for two-terminal flexible low-frequency transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 31-39.
- [30] 李自明, 姚秀萍, 王海云, 等. 不同风电机组并网对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 16-21.
LI Ziming, YAO Xiuping, WANG Haiyun, et al. Influence of different wind turbine generators integration to power system transient voltage stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2): 16-21.
- [31] 汤蕾, 沈沉. 大规模风电接入对电力系统暂态稳定性影响机理研究[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(4): 25-33.
TANG Lei, SHEN Chen. The impact of large-scale wind generation on power system transient stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4): 25-33.
- [32] 林涛, 林政阳, 李晨, 等. 基于TCN的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 169-177.
LIN Tao, LIN Zhengyang, LI Chen, et al. Small signal stability assessment of grid-connected system for grid-following/grid-forming hybrid new energy stations based on TCN[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 169-177.
- [33] CHEN L, MIN Y, HAO L S, et al. Large-disturbance stability analysis of power systems with synchronous generator and converter-interfaced generation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(3): 997-1002.
- [34] 王慧, 赵书强, 陈旭博, 等. 含类虚拟同步发电机和柔性负荷的直流微电网大信号稳定控制方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 705-716.
WANG Hui, ZHAO Shuqiang, CHEN Xubo, et al. Large signal stability control method of DC microgrid with analogous virtual synchronous generator and flexible load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 705-716.
- [35] LIU S C, LI X, XIA M Y, et al. Takagi-Sugeno multimodeling-based large signal stability analysis of DC microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12670-12684.