

# 基于阻抗分析的风力发电-柔直系统稳定性分析

高翔<sup>1</sup>, 彭程<sup>2</sup>, 赵利辉<sup>3</sup>, 宁中天<sup>3</sup>

(1. 中国石油集团电能有限公司 气电公司, 黑龙江 大庆 163453; 2. 东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318;  
3. 中国石油集团电能有限公司 运维分公司, 黑龙江 大庆 163453)

**摘要:**随着海上风电的快速发展,风电场通过柔性直流输电(VSC-VDC)系统实现远距离送电逐渐成为主流,但系统稳定性问题日益突出。为此,围绕风力发电与柔直输电系统在海洋环境下的运行稳定性开展深入研究。首先,构建风电场及其接入的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的阻抗模型,分析其电气特性与阻抗结构,为系统稳定性分析提供基础支撑。其次,基于阻抗建模结果,引入奈奎斯特稳定性判据,评估风电-柔直互联系统的稳定性边界,并明确关键参数对系统动态性能的影响规律。然后,以乳山海上风电项目为工程案例,借助MATLAB/Simulink平台构建仿真模型,对系统在典型运行场景下的电压、电流、频率响应进行时域仿真分析,深入探讨系统的稳定运行特性。最后,通过对比理论计算与仿真结果,验证了阻抗分析法在稳定性评估方面的有效性,研究成果为海上风电并网系统的规划设计与安全运行提供了理论支持与技术依据。

**关键词:** 风力发电; 柔性直流输电; 阻抗分析法; 海上风电; 柔直输电系统; 稳定性分析

中图分类号: TP391; TM743

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0070-06

## Stability analysis of wind power-soft and direct transmission system based on impedance analysis

GAO Xiang<sup>1</sup>, PENG Cheng<sup>2</sup>, ZHAO Lihui<sup>3</sup>, NING Zhongtian<sup>3</sup>

(1. Gas and Electricity Branch, CNPC Electric Energy Co., Ltd., Daqing 163453, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

3. Operation and Maintenance Branch, CNPC Electric Energy Co., Ltd., Daqing 163453, China)

**Abstract:** With the rapid development of offshore wind power, long-distance power transmission via flexible direct current (VSC-HVDC) systems has become increasingly prevalent, while system stability issues have drawn growing concern. This paper conducts an in-depth study on the operational stability of wind power generation and VSC-HVDC systems under marine environments. Firstly, impedance models of the wind farm and its connected modular multilevel converter (MMC) are established to analyze their electrical characteristics and impedance structure, providing a foundation for system stability assessment. Secondly, based on the impedance modeling results, the Nyquist stability criterion is introduced to evaluate the stability boundaries of the wind power-VSC-HVDC interconnected system and to clarify how key parameters influence system dynamic behavior. Then, taking the Rushan offshore wind power project as a case study, a simulation model is built using the MATLAB/Simulink platform to perform time-domain simulations of voltage, current, and frequency responses under typical operating conditions, offering insights into the system's stable operation characteristics. Finally, the comparison between theoretical calculations and simulation results confirms the effectiveness of the impedance-based method in assessing system stability. The research provides theoretical support and technical guidance for the planning, design, and secure operation of offshore wind power grid-connected systems.

**Keywords:** wind power generation, flexible dc transmission, impedance analysis; offshore wind power; flexible direct transmission system; stability analysis

## 0 引言

随着风力发电的大规模接入和 HVDC 技术的广泛应用,电力系统面临新的稳定性挑战。国内外学者通过特征值分析法,主要关注系统的极点分布及其与稳定性之间的关系,用于揭示系统动态行为和稳定性边界<sup>[1-5]</sup>。特征值分析法虽然在理论上较为直接,但当面对复杂系统时,其计算过程可能变得异常繁重,从而限制了它的应用范围。阻抗分析法则通过建立系统阻抗模型,研究电气特性对稳

定性的影响,特别是在风电接入和柔直系统等新型电力传输方式下,能够有效识别系统潜在的不稳定性。相对而言,阻抗分析法则显得更为高效,特别适合于处理复杂的互联系统稳定性问题。通过将整个系统拆分成若干个更小的子系统,并为每个子系统建立相应的阻抗模型,研究者可以借助 Middlebrook 定理和奈奎斯特稳定性准则来评估整个系统的稳定状态,进而确定系统稳定运行的参数界限。为判断风力发电与柔直输电系统的运行稳定性<sup>[6-8]</sup>,精确界定系统稳定运行的参数范围,本文利用阻抗分析

收稿日期:2024-04-22

法,通过为风电场及其侧接的模块化多电平换流器(MMC)构建阻抗模型,对互联系统的稳定性进行分析。为了验证理论分析的准确性,本文还将在 MATLAB/Simulink 仿真环境中进行一系列的仿真实验,以实际数据支持的研究成果。

## 1 风场阻抗模型

为了深入探讨风力发电与 MMC 之间的交互作用,构建一个准确的风电场的电气阻抗模型是至关重要的<sup>[9-10]</sup>。在建模过程中,将双馈感应型风力发电机组的电气阻抗分解为3个关键部分:转子侧阻抗、电网侧阻抗以及直流环节阻抗<sup>[11]</sup>。这些部分共同构成了双馈感应风力发电机组的等效阻抗网络,其中每个部分都承担着特定的功能,并对风电机组的总体性能产生影响。

### 1.1 风机组阻抗模型

在构建了单台风力发电机组的阻抗模型之后,接下来的任务便是将这些个体模型综合起来,形成能够代表整个风电场的聚合阻抗模型。这个模型不仅需要反映风电场内部众多发电机组的集体行为,还应该考虑到风电场与外部电网之间的动态互动。根据双馈异步风力机等效阻抗电路图1可知,网侧的交流侧和直流侧模型表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{cd}^g \\ i_{cq}^g \end{bmatrix} = Y_{gdq}(s) \cdot \begin{bmatrix} u_{sd}^g \\ u_{sq}^g \end{bmatrix} + C_{2 \times 1} \cdot u_{dc} \quad (1)$$

$$i_{dc}^2 = D_{2 \times 1} \cdot \begin{bmatrix} u_{sd}^g \\ u_{sq}^g \end{bmatrix} + Y_{gdq} \cdot u_{dc} \quad (2)$$

式中,  $i_{cd}^g, i_{cq}^g$  为二倍频负序的旋转坐标系中内部不平衡电流的  $dq$  轴分量;  $Y_{gdq}$  为导纳矩阵的频域函数;  $u_{sd}^g, u_{sq}^g$  为定子侧  $dq$  轴电压分量;  $C_{2 \times 1}, D_{2 \times 1}$  为耦合矩阵;  $u_{dc}$  为系统直流电压;  $i_{dc}^2$  为系统直流电流。

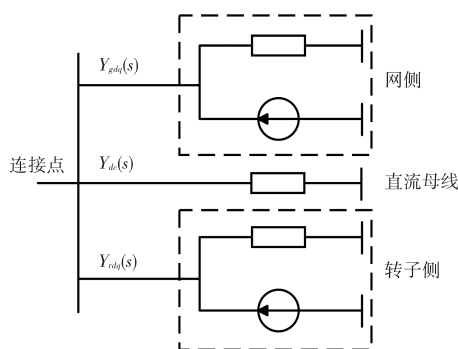


图1 双馈风力发电机的等值阻抗原理图

转子侧的交流侧和直流侧模型表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{sd}^g \\ i_{sq}^g \end{bmatrix} = Y_{rdq} \cdot \begin{bmatrix} u_{sd}^g \\ u_{sq}^g \end{bmatrix} + A_{2 \times 1} \cdot u_{dc} \quad (3)$$

$$i_{dc}^1 = B_{2 \times 1} \cdot \begin{bmatrix} u_{sd}^g \\ u_{sq}^g \end{bmatrix} + Y_{rdq} \cdot u_{dc} \quad (4)$$

式中,  $i_{sd}^g, i_{sq}^g$  为转子绕组电流在  $dq$  轴中的分量;  $A_{2 \times 1}, B_{2 \times 1}$

为耦合矩阵。

连接点的等效直流阻抗为

$$\begin{bmatrix} i_{00d}^g \\ i_{00q}^g \end{bmatrix} = (Y_{rdq} + Y_{gdq}) \cdot \begin{bmatrix} u_{sd}^g \\ u_{sq}^g \end{bmatrix} + (C_{2 \times 1} + A_{2 \times 1}) \cdot u_{dc} \quad (5)$$

根据式(1)~(4),能够将3个电阻并联而求出双馈感应风力涡轮机的阻抗:

$$\begin{bmatrix} i_{00d}^g \\ i_{00q}^g \end{bmatrix} = (Y_{gdq} - Y_{rdq} + Y_{dc}) \begin{bmatrix} u_{sd}^g \\ u_{sq}^g \end{bmatrix} = Y_{dfig} \begin{bmatrix} u_{sd}^g \\ u_{sq}^g \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $i_{00d}^g, i_{00q}^g$  为控制网侧无功功率的  $dq$  轴电流。

### 1.2 风电场的聚合阻抗模型

为了容易地在风力发电场中的任何地方聚集风力涡轮机单元,该单元之间的呈放射状的混合配置被改变成平行配置。这要求对应于风力涡轮机的参数和功率收集网络的结构和参数,这样的变换方法可以提高风电场的整体运行效率,并优化电网的稳定性和可靠性。

## 2 柔直输电系统阻抗建模

在考虑柔直输电系统处于三相稳定状态的前提下,对 MMC 交流系统的风场侧阻抗模型进行推导。假设 MMC 系统的正序和负序阻抗一致,即风场侧的电抗是对称的。可以通过对称分析的方法来推导出 MMC 系统风场侧的准确阻抗模型表达式为

$$\begin{cases} K_{u1} = \frac{[mI_o e^{j\varphi_o} - 2i_{co}] [H_i(s - j\omega_s) H_i(s - j\omega_s) - 1]}{sC_{bng} U_{dc}} \\ K_{i1} = \frac{[mI_o e^{j\varphi_o} - 2i_{co}] H_i(s - j\omega_s)}{sC_{bng} U_{dc}} - [R + sL + \frac{1+m^2}{4sC_{bng}}] \\ K_c = \frac{m}{sC_{bng}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $K_{u1}, K_{i1}, K_c$  为增益系数;  $C_{bng}$  为桥臂电容;  $H$  为传递函数;  $m$  代表着调制度,可以理解为稳态下单位电压的幅值与直流电压的一半之比,即  $m = \frac{2e_j}{U_{dc}}$ ; 而  $I_o$  则代表着系统稳定状态下交流电路基频相电流的幅值,  $\varphi_o$  则表示其相位的初始角度。接下来详细探讨这些参数对系统性能的影响。在实际系统设计中,需要对电力电子变换器进行控制,以确保其稳定性和有效性。

假定 MMC 的内回路抑制控制器发生故障,并且 MMC 的子模块的电容电压是均衡的,则得到了 MMC 的双频回路电流和交流的基本频率之间的关系为

$$\Delta i_c(s) \approx P_{i1} \Delta i_j(s) = \frac{9m}{96(s - j\omega_s) [2L(s - j\omega_s) + R] + 12 + 8m^2} \Delta i_j(s) \quad (8)$$

式中,  $P_{i1}$  表示传递函数。

最终得出没有扰动分量的 MMC 小信号阻抗表达式为

$$Z_{MMC}(s) = \frac{\Delta u_j(s)}{\Delta i_j(s)} = \frac{K_c P_{i1} - K_{i1}}{K_{u1}} \quad (9)$$

式中,  $Z_{MMC}$  表示 MMC 小信号阻抗;  $\Delta u_j$  回路电压的小信号变化量;  $\Delta i_j$  回路电流的小信号变化量。

### 3 风电-柔直系统阻抗稳定性分析

#### 3.1 等效电路图

根据图 2 电路中, 可以看到风电场通过风电场的等效阻抗  $Z_{wf}$  将其输出电流传输到互联运行系统中。同时, 在风场侧 MMC 的等效阻抗  $Z_{MMC}$  的作用下, 通过交流输电线路的阻抗  $Z_L$  将电流传输至目标地点。

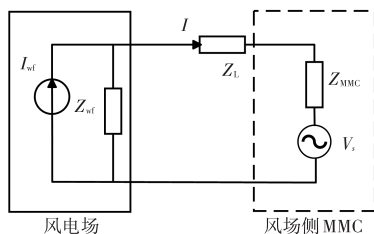


图 2 风电柔直互联系统等效图

这一设计使得风电场和风场侧 MMC 通过电流传输的方式实现相互连接。通过风电场的等效阻抗和风场侧 MMC 的等效阻抗, 交流输电线路的阻抗可以有效传输电流, 并实现风电场的输出功率的传输。这样, 实现了风电场和风场侧 MMC 的互联运行系统。

根据图 2, 可以得到:

$$I(s) = \left[ I_{wf}(s) - \frac{V_s(s)}{Z_{wf}(s)} \right] \left[ \frac{1}{1 + (Z_{MMC}(s) + Z_L(s))/Z_{wf}(s)} \right] \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{1}{1 + (Z_{MMC}(s) + Z_L(s))/Z_{wf}(s)} \quad (11)$$

式中,  $I(s)$  风电场的输出电流;  $V_s$  为电网电压;  $Z_{wf}$  风电场的等效输出阻抗 (复频域)。

#### 3.2 风电场-柔直系统阻抗模型验证

通过试验对所建立的风力机和风场风电池的阻抗模型进行了验证。首先, 将电压源输入到双馈风力发电系统中, 并在 0~100 Hz 的频率下扫描该系统的阻抗。然后, 在相同频率下, 将一个电流源以 5% 的额定电流的幅度施加到风区 MMC 上。通过扫描得到的阻抗模型与之前推导的公式进行比较, 结果如图 3 和图 4 所示。

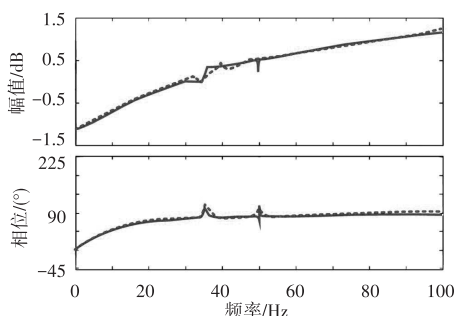


图 3 风电机组阻抗模型

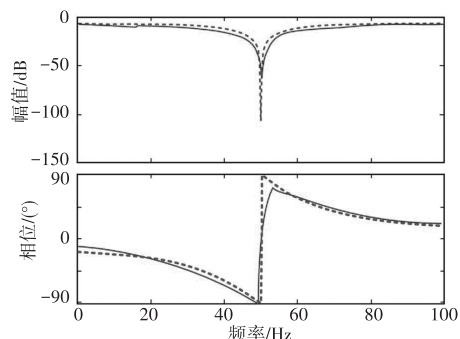


图 4 风场侧 MMC 阻抗模型

在图 3 中, 虚线代表实验测量得到的阻抗曲线, 而实线则是根据理论计算得到的阻抗曲线。在图 4 风场侧 MMC 阻抗模型中, 实线代表实验测量得到的阻抗曲线, 而虚线则是根据理论计算得到的阻抗曲线。可以看出, 在大部分频率范围内, 实测值与理论计算值基本吻合, 显示出阻抗频率特性曲线的一致性。尽管存在一些细微的误差, 但在关键的低频区域, 两者基本相符。

这个实验结果进一步验证了推导的阻抗模型的正确性。虽然存在一些误差, 但这可能是由于实际系统中的非线性和不确定性因素导致的。通过对阻抗曲线的比较, 可以得出结论, 阻抗模型在大部分情况下是准确的, 并且可以用来预测风电机组和风场侧 MMC 的行为<sup>[12]</sup>。

总之, 这个实验为进一步理解风电机组和风场侧 MMC 的阻抗特性提供了有力的支持, 为风电系统的设计和运行提供了重要的参考。

#### 3.3 风电场-柔直系统稳定性分析

在电力系统阻抗分析法中, 为了保证电力系统的稳定运行, 各子系统之间的稳定是至关重要的。假定风力发电场和风力发电侧 MMC 两个系统都是稳定的, 当它们单独工作时, 系统处于稳定。当两个系统连接起来工作的时候, 风力发电的柔直系统的稳定性依赖于传输功能  $G(S)$  的稳定性。由奈奎斯特判定  $(Z_{MMC}(s) + Z_L(s))/Z_{wf}(s)$  可知, 若该阻抗特性曲线不围绕  $(-1, j0)$ , 则能够实现该互连体系的稳定。

通过下面的阻抗分析对相互连接的系统的稳定性进行分析:

(1) 当各个子系统处于理想的稳定状态时, 风力发电系统和风力发电侧的 MMC 系统的内在稳定性是有保障的。

(2) 建立了一种奈奎斯特稳定准则: 当不具有右半平面上的极点的情况下, 当  $G(S)$  不具有右半平面上的极点的情况下, 网络的等效阻抗的奈奎斯特稳定准则奈奎斯特曲线不会围绕  $(-1, j0)$  点。

通过画出风力发电场和风力发电场一侧的 MMC 系统的等效阻抗的奈奎斯特曲线 (Nyquist curve), 可以确定风力发电场和风力发电场一侧的 MMC 系统的等效阻抗。进而进行稳定性分析。如果奈奎斯特曲线不包围  $(-1, j0)$

点,则说明系统互联运行时具有稳定性;反之,若奈奎斯特曲线包围 $(-1, j0)$ 点,则说明系统可能会出现不稳定现象,需要进行进一步的分析和调试。

需要注意的是,以上方法只是一种辅助分析的手段,其他稳定性分析方法也要结合使用,以全面评估系统的稳定性。同时,在进行稳定性分析时,还需要考虑系统的工作条件、参数变化以及控制策略等因素,确保系统的可靠运行<sup>[13-14]</sup>。

奈奎斯特判据是一种用于信号处理和系统控制中的重要原理,它指出一个系统能够稳定工作的必要条件是系统的频率响应函数在复平面上的所有极点都位于左半平面。在实际应用中,可以通过绘制系统的频率响应曲线并对其进行稳定性分析来判断系统是否稳定。奈奎斯特判据为设计稳定系统提供了重要的理论基础,也帮助工程师更好地理解 and 掌握系统的稳定性能,从而保证系统在各种工况下能够可靠地工作。如图 5~7 所示。

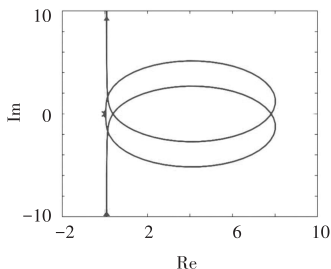


图 5 风电场系统奈奎斯特图

从图 5 可以清楚地看出,奈奎斯特图没有环绕点 $(-1, j0)$ 的路径,这意味着系统是稳定的。因此根据奈奎斯特判据,可以得出这个风电场系统是可靠的。

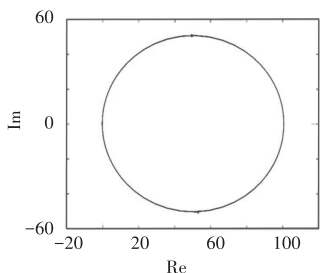


图 6 风场侧 MMC 系统奈奎斯特图

根据图 6,奈奎斯特图中并没有出现包围点 $(-1, j0)$ 。这意味着根据奈奎斯特判据,该风场侧 MMC 系统是处于稳定状态的。因此,系统在当前工况下不会产生不稳定的振荡现象。这也说明了系统设计和控制方案的有效性,能够确保系统在运行过程中保持稳定性,为风电场的安全运行提供了保障。至于如何进一步优化系统性能和稳定性,还需进一步的研究和探讨。

根据上述研究结果显示,风电场和风场侧 MMC 系统均表现出良好的稳定性,对于互联系统的运行具有积极的影响。从 $(Z_{MMC}(s) + Z_L(s))/Z_{wf}(s)$ 和奈奎斯特图中可以清晰地看出这种稳定性。

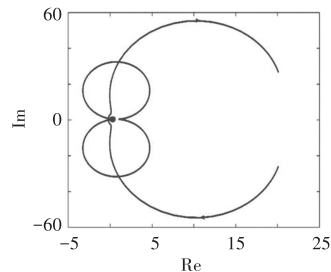


图 7 风电场及柔直风场侧互联系统奈奎斯特图

从图 7 的奈奎斯特图可以观察到,风电场和风场侧 MMC 互联系统未围绕点 $(-1, j0)$ ,这意味着整个互联系统是稳定的。根据奈奎斯特准则,系统稳定性取决于奈奎斯特图是否环绕点 $(-1, j0)$ 。因此,在这种情况下,可以得出结论,风电场和风场侧 MMC 互联系统是稳定的。

#### 4 案例分析

乳山风力发电项目是中国国家能源局于 2019 年批准的一个重要能源项目。该项目位于山东省乳山市海域,总装机容量为 600 MW。为了实现乳山市的风电发展目标,该项目计划建造一个升压站并在陆地上建设一个集控中心。升压站将配备 53 台单机容量为 8.5 MW 的明阳智能 MySE8.5-230 型号风机。这些风机的主机重量为 390 t,轮毂中心高度为 130.9 m,叶轮直径为 230 m,扫风面积相当于将近 100 个标准篮球场的大小。集控中心将配备适用于大容量风电场的 66 kV 集电系统,这将节约用海面积约 190 公顷,节约造价约 1.8 亿元。位置如图 8 所示。

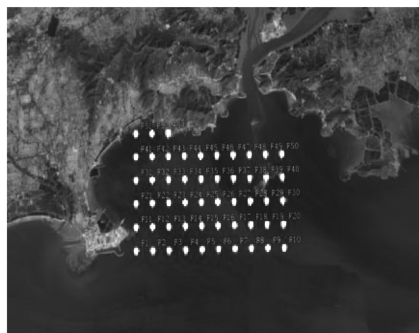


图 8 风机分布图

##### 4.1 风电机组选型

根据场址模拟的风能资源特点,在风场范围内进行风机模拟排布是非常重要的。通过结合当地的风资源、地形以及交通因素,初步选型 MySE8.5-230 机组,该机型的轮毂高度为 130.9 m。然而,要确定该机型是否能够满足安全性要求,需要实测数据来进行详细评估。实测数据将提供更准确的信息,更好地了解风机在风场中的表现,以及是否能够安全可靠地运行。通过科学的数据评估,可以确保风机的布局与选型符合实际需求,从而为风能资源的利用和风电项目的建设提供有力支持。

具体参数见表 1。

表 1 风机参数

机型名称	额定功率/ kW	风轮直径/ m	扫风面积/ m <sup>2</sup>	切入风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	切出风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	10 min 平均值/ (m·s <sup>-1</sup> )	设计使用 寿命/a
MySE8.5-230	8 500	230	41 548	3	7.4	25	25

4.2 稳定性分析

为了对上述提出的风力发电-柔直系统的稳定运行问题进行验证,本文利用 Simulink 对其进行了时间域建

模,并对其进行了仿真研究。系统 Simulink 仿真模型图如图 9 所示。

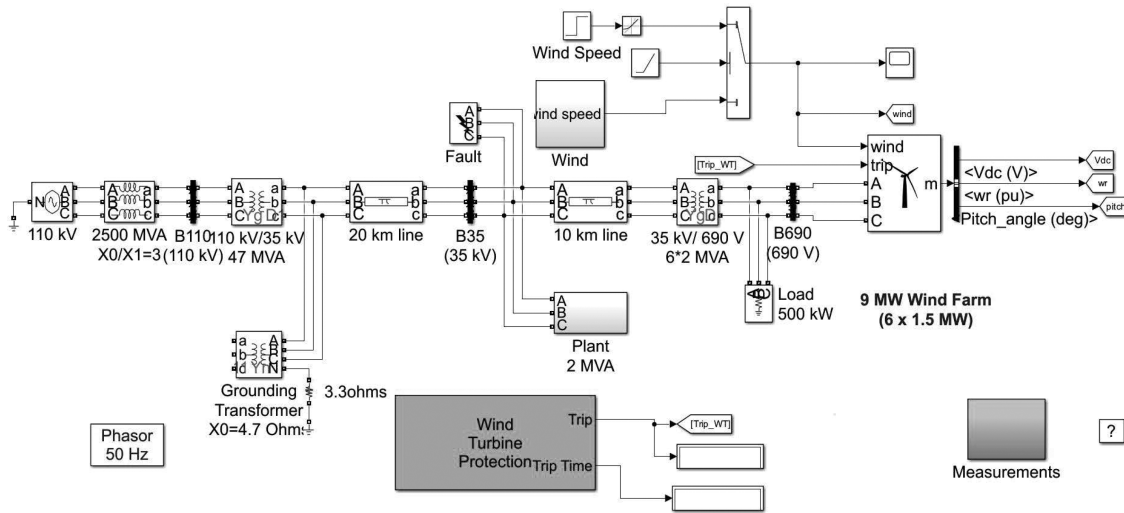


图 9 Simulink 仿真模型系统

在此基础上,对电力系统中 PCC 节点的电压、电流特性做了详细的研究。由该实验结果可知,该体系具有较好的稳定性。虽然系统中出现了一些相位偏差,这会引起谐波和低频振荡,但是总体上不会对输出电压和电流的稳定性造成影响<sup>[15-17]</sup>,如图 10~12 所示。

如图 10~12 所示,通过仿真得到该系统在正常工作时的互联系统 PCC 点的电压,电流和频率曲线,可以明显看出,电压、电流的波形均处于正常状态,无明显畸变。系统频率也在允许的波动范围以内,说明整个系统的运行是稳定的。

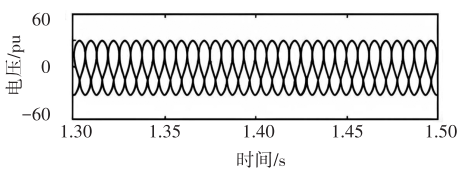


图 10 正常互联系统 PCC 点处电压

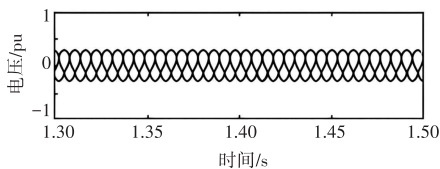


图 11 正常互联系统 PCC 点处电流

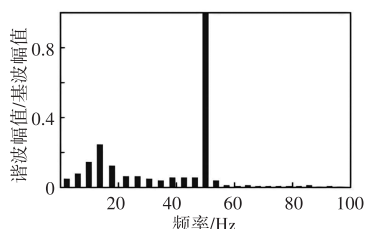


图 12 正常互联系统 PCC 点处频率

5 结束语

本文提出了一种基于阻抗分析的风电-柔直并网系统稳定性评价方法。通过奈奎斯特稳定判据的分析表明,风电场的输出功率不同,对电网的稳定有很大的影响。利用 Simulink 对远海风力发电与柔性直流输电互连网络进行建模,以检验本文所提出的理论分析方法的正确性。时域模拟结果显示:理论分析与仿真结果吻合一致,验证了对系统稳定性影响的判断。

参考文献

[1] 杨强, 仲卫, 谢善益, 等. 基于粒子群算法优化 PID 的海上风电柔直并网系统调频控制[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43 (8): 144-148.  
 [2] 张天龙, 陈海焱, 姜海博, 等. 海上风电柔性直流技术研究进展与展望[J]. 电力勘测设计, 2024 (5): 25-31.  
 [3] 闫丽梅, 刘永强, 徐建军, 等. 基于 Grabcut 分割和填充物面积判别的复合绝缘子断串诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 114-119.  
 [4] 姚伟, 熊永新, 姚雅涵, 等. 海上风电柔直并网系统调频控制综述[J]. 高电压技术, 2021, 47 (10): 3397-3413.

(下转第 142 页)