

基于虚拟阻抗控制的跟/构网混联经柔性直流送出系统中传输容量提升与构网占比优化策略

邓晓洋¹, 吴林林¹, 李立沅², 王潇¹

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司(国网冀北电力有限公司电力科学研究院), 北京 100045; 2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 济南 250061)

摘要: 为了解决跟/构网混联风电场经柔性直流送出系统中因系统传输容量提升及构网型风机容量占比降低引发的振荡问题, 建立了系统整体的状态空间模型, 基于该模型采用根轨迹法与模态分析方法, 识别了在不同工况下导致系统振荡的主导参与因子。分析结果表明, 系统振荡主要受构网型风机和柔性直流换流站电压外环相关变量的影响。在此基础上提出了一种在构网型风机与柔直换流站的电压外环中引入虚拟阻抗的控制策略, 以改善系统的阻抗特性, 抑制振荡现象。通过根轨迹分析进一步确定了虚拟阻抗参数的合理设置范围。最后, 通过仿真验证了所提出虚拟阻抗控制方法能够有效提升系统运行性能, 证明了所提策略的可行性和有效性。

关键词: 构网型控制; 混联系统; 构网型风机比例; 虚拟阻抗; 柔性直流; 振荡抑制

Virtual Impedance-Based Control Strategy for Transmission Capacity Enhancement and Grid-Forming Proportion Optimization in Following/ Forming Hybrid VSC DC Systems

DENG Xiaoyang¹, WU Linlin¹, LI Lifeng², WANG Xiao¹

(1. North China Research Institution Co., Ltd., State Grid Jibei Electric Co., Ltd. Electric Power Research Institution, Beijing 100045, China; 2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to address the oscillation issues induced by the increase in system transmission capacity and the reduction of grid-forming wind turbine capacity share in grid-forming and grid-following hybrid wind farms delivered via VSC DC transmission systems, a overall state-space model of the system is established. Based on this model, root locus and modal analysis methods are employed to identify the dominant contributing factors to system oscillations under different operating conditions. The analysis results indicate that system oscillations are mainly influenced by the control variables associated with the voltage outer loops of the grid-forming wind turbines and the VSC DC converter stations. On this basis, a control strategy introducing virtual impedance into the voltage outer loops of the grid-forming wind turbines and the VSC DC converter stations is proposed to improve the system impedance characteristics and suppress oscillations. Furthermore, the feasible parameter range for the virtual impedance is determined through root locus analysis. Finally, simulation results validate that the proposed virtual impedance control method can effectively enhance system performance, thereby confirming the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: grid-forming control; hybrid systems; grid-forming wind turbine proportion; virtual impedance; VSC DC; oscillation suppression

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2402800); 华北电力科学研究院有限责任公司科技项目(KJZ2023124)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China(2022YFB2402800); the Science and Technology Program of North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.(KJZ2023124).

0 引言

随着能源结构向低碳化转型,新能源占比不断提高,新型电力系统的构建成为必然趋势。在此背景下,风电作为新能源的重要组成部分,正迎来前所未有的发展机遇。海上风电凭借资源丰富、风速稳定、利用效率高等优势,在全球范围内的装机规模快速增长,成为推动能源结构转型和绿色低碳发展的关键力量^[1]。此外,随着海上风电技术的进步,深远海风电的开发潜力正在逐步释放,为构建高比例新能源电力系统提供了重要支撑^[2]。

柔性直流输电简称柔直(voltage source converter-based high voltage direct current, VSC-HVDC)是一种基于电压源型换流器的直流输电技术,具有独立调节有功功率和无功功率、功率双向传输、适应弱电网等优势,在远距离输电、大规模新能源并网以及复杂环境适应性方面优势显著,特别适用于深远海风电的高效稳定送出^[3-4]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)因其高度模块化、低开关损耗等优点,近年来在柔性直流输电技术中得到了广泛应用^[5-6]。目前,风力发电机组大多采用跟网型控制(grid-following, GFL)策略,即通过锁相环追踪电网的相位和频率,从而实现稳定并网。海上电网的频率由送端柔直换流站通过V/f控制产生,然而,随着未来海上风电场规模的不断扩大,柔直换流站对远端风场的电压支撑能力减弱,送端电网特性逐渐向低短路比(short-circuit ratio, SCR)的弱电网演变,大规模海上风电柔性直流输电工程接入电网将面临更严峻的稳定性挑战^[7-9]。在此背景下,构网型(grid-forming, GFM)技术被认为是提升海上风电并网稳定性的关键突破。相比传统跟网型风机,构网型风机不依赖外界交流电网,能够自主建立并维持电网电压和频率,并具备一定的惯量响应和电压支撑能力。有研究表明,构网型变流器的加入可提高跟网型变流器在新能源高占比场景下的稳定性^[10-12]。因此,在未来海上风电经柔直送出系统中,风电场内跟网型与构网型变流器混联运行将成为重要的发展趋势。

然而,针对跟/构网换流器混联型风电场经柔直送出中如何确定构网型风机的容量配比以及控制参数对构网型占比、传输容量限制的影响目前尚未有明确定论。文献[13-14]分析了在以跟网型变流

器为主导的新型电力系统中加入构网型变流器可有效提升系统的稳定性,并指出要合理地配置构网型变流器的容量,但并未给出配置方法。文献[15-18]基于小信号稳定性分析或阻抗模型给出了跟/构网混联型变流器的配置方法,并确定出满足稳定约束的GFM变流器的最低占比,但均未考虑是否可以通过附加控制进一步降低GFM变流器的容量配比。文献[19]从小干扰稳定性的角度出发,分析了跟/构网混联系统中控制参数对GFM变流器占比下限的影响,而对附加控制参数提升系统最大传输容量的优化问题并未展开研究。以上研究均是基于跟/构网换流器混联系统接入弱电网的情形,在跟/构网换流器混联系统经柔直送出方面,文献[20]分析了构网型的接入可提升海上风电经柔直送出的主动支撑能力,并探讨了构网型海上风电场经柔直外送的特点、技术路线及未来工程实现。文献[21]从多维度综合评估了跟/构网换流器混联与水电结合打捆经柔直送出系统的传输能力并给出系统稳态可行域。

综上所述,现有关跟/构网换流器混联系统的研究大多针对接入交流弱电网的情形,当接入柔直外送系统时,系统动态交互特性较传统交流弱网更为复杂;且现有关GFM变流器容量占比的研究仅通过稳定性判据分析得出一个最低比例,在综合场站改造成本和经济性建设约束的情况下,未考虑是否可以通过附加控制进一步降低构网占比及提升系统传输容量。为深入研究上述问题,本文首先构建跟/构网换流器混联风电场经柔直送出系统的状态空间模型,并利用小信号分析与特征值根轨迹方法研究其动态特性。随后,进一步分析关键因素对系统稳定性的影响,揭示跟/构网换流器混联系统与柔直换流站之间的动态交互机理,为优化控制策略提供理论支撑。最后,提出在GFM控制环路及柔直换流站控制外环中引入虚拟阻抗的方法,以抑制系统振荡风险,降低对构网型风机容量占比的硬性需求,并提升系统整体的功率传输能力。

本文的创新点主要包括以下两点。

1) 现有研究主要聚焦于跟/构网换流器混联系统接入交流弱电网的情况,而本文针对其接入柔直外送系统时的动态特性,构建了系统的状态空间模型,并进行了深入分析。

2) 提出在构网型风机及柔直换流站的电压控制

外环中附加虚拟阻抗的方法, 重塑交流网络的等效阻抗, 进一步降低对构网型风机容量的硬性要求, 从而减少改造成本, 提升系统整体的功率传输能力。

1 跟/构网混联经柔直送出系统结构和模型

1.1 系统结构和控制结构

本文研究的跟/构网混联风电场经柔直送出系统的拓扑如图 1 所示。

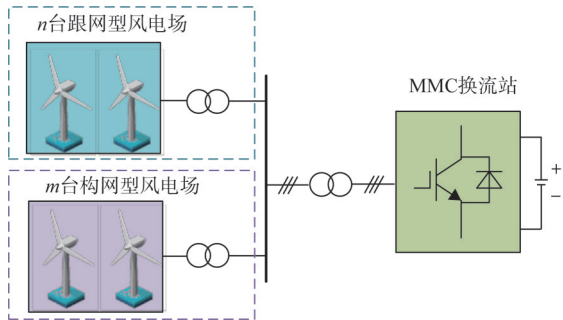


图 1 混联风电场与柔直的拓扑

Fig. 1 Topology of hybrid wind farm and VSC-HVDC

风电场站经多级变压器及输电线路连接于送端柔直换流站。对于采用相同控制策略的并网直驱风电机组群, 可以根据容量加权等效原则将风电场多机系统等值为单台设备^[22]。

其中, 跟网型直驱风机采用传统的并网控制方式, 控制结构如图 2 所示, 机侧换流器(machine side converter, MSC)采用矢量控制策略。通过调节发电机转速, 实现对风能的最优捕获同时控制电流以稳定运行; 网侧换流器(grid side converter, GSC)则通过直流母线电压控制来稳定功率输出, 并采用电流内环调节有功和无功功率, 同时配合锁相环(phase-locked loop, PLL)持续追踪电网相位, 确保机组输出电压保持与电网同步。

对于构网型风机, 其控制结构如图 3 所示。其采用虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略, 机侧换流器负责稳定直流母线电压, 网侧控制则基于 VSG 算法, 通过模拟同步发电机的惯性和阻尼特性, 调节有功功率以提供惯性支撑和频率响应, 同时可以调节无功功率输出, 使风机具备一定的电压支撑能力。

海上送端柔直换流站则采用定交流电压定频率(V/f)的控制策略, 作为稳定电压源为系统提供电

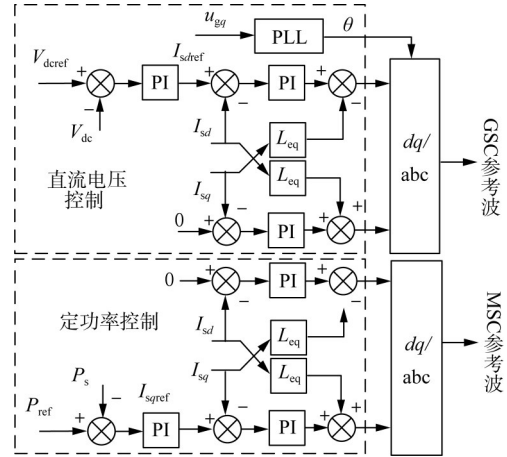


图 2 跟网型风机控制框图

Fig. 2 Control diagram of grid-following wind turbine

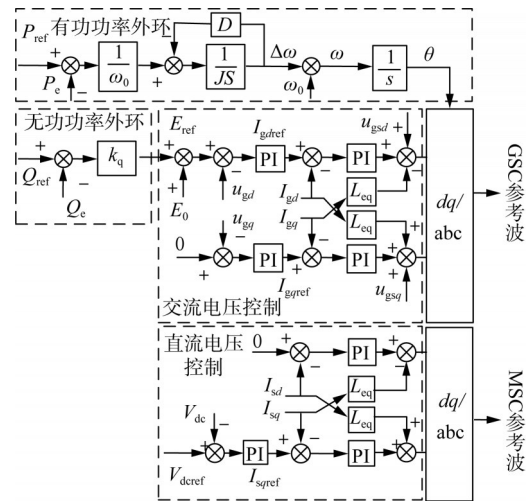


图 3 构网型风机控制框图

Fig. 3 Control diagram of grid-forming wind turbine

压和频率基准。

1.2 系统状态空间模型

对于跟网型直驱风机与构网型直驱风机而言, 由于网侧换流器与机侧换流器之间通过直流电容实现了有效的电气隔离, 使得机侧对并网系统动态特性的影响较小。因此, 跟网型风电机组机侧等效为直流电流源, 构网型风电机组机侧等效为直流电压源, 从而在保证建模精度的前提下实现系统建模的简化与分析效率的提升^[23]。基于此, 本文在系统稳定性分析中, 以网侧换流器为核心, 建立并研究小信号模型, 重点探讨其对系统动态行为的影响。构网型换流器跟网型换流器以及海上送端柔直换流站的建模思路可参考文献[24-26]。

由于各子系统的状态空间方程是在各自的旋转

坐标系下建立的,为实现各子系统状态空间方程的互联,本文选定MMC换流站的旋转坐标系作为基准坐标系,定义跟网型网侧换流器、构网型网侧换流器、柔直换流站旋转坐标系的旋转角速度和相角分别为 ω_{GFL} 、 ω_{GFM} 、 ω_{MMC} 、 θ_{GFL} 、 θ_{GFM} 、 θ_{MMC} 。

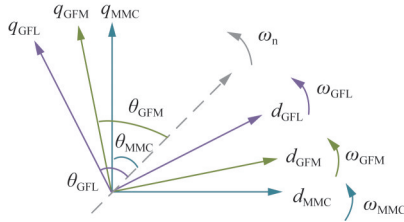


图4 各子系统坐标系相对位置

Fig. 4 Relative positions of the coordinate systems of each subsystem

由图4可知,以换流器出口处电压为例,各子系统状态变量与柔直换流站坐标系之间的转换关系如式(1)–(2)所示。

$$\begin{cases} u_{d1} = u_{d\text{GFL}} \cos(\theta_{\text{GFL}} - \theta_{\text{MMC}}) - \\ u_{q\text{GFL}} \sin(\theta_{\text{GFL}} - \theta_{\text{MMC}}) \\ u_{q1} = u_{q\text{GFL}} \cos(\theta_{\text{GFL}} - \theta_{\text{MMC}}) + \\ u_{d\text{GFL}} \sin(\theta_{\text{GFL}} - \theta_{\text{MMC}}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{d2} = u_{d\text{GFM}} \cos(\theta_{\text{GFM}} - \theta_{\text{MMC}}) - \\ u_{q\text{GFM}} \sin(\theta_{\text{GFM}} - \theta_{\text{MMC}}) \\ u_{q2} = u_{q\text{GFM}} \cos(\theta_{\text{GFM}} - \theta_{\text{MMC}}) + \\ u_{d\text{GFM}} \sin(\theta_{\text{GFM}} - \theta_{\text{MMC}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_{d\text{GFL}}$ 、 $u_{q\text{GFL}}$ 分别为跟网型风机出口处电压的 d 、 q 轴分量; u_{d1} 、 u_{q1} 分别为将其转换至柔直坐标系下的 d 、 q 轴分量; $u_{d\text{GFM}}$ 、 $u_{q\text{GFM}}$ 分别为构网型风机出口处电压的 d 、 q 轴分量; u_{d2} 、 u_{q2} 分别为将其转换至柔直坐标系下的 d 、 q 轴分量。

联立跟网型、构网型、柔直换流站以及坐标转换方程,可得如式(3)所示系统的状态空间模型。

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A\Delta x + B\Delta u \quad (3)$$

式中: A 和 B 分别为系统的状态矩阵和输出矩阵; Δx 为系统的状态变量; Δu 为系统的输入变量。

2 系统振荡因素分析

本节基于构建的完整状态空间方程,结合不同工况下的特征根轨迹分析系统探讨了关键因素对系统稳定性的影响及其作用机制。为进一步量化各参数对系统动态特性的影响,引入参与因子分析方

法,评估各关键变量的贡献度。此外,通过仿真对特征根轨迹分析结果进行了验证,确保分析的准确性与可靠性。

2.1 系统传输容量

短路比(short circuit ratio, SCR) S_{SCR} 定义为公共连接点(point of common coupling, PCC)短路容量与风电场传输容量的比值^[27–29],即

$$S_{\text{SCR}} = \frac{U_N^2}{S_N |Z_g|} \quad (4)$$

式中: U_N 为系统额定电压; S_N 为系统传送容量; Z_g 为系统等值阻抗。该比值反映了电网对风电场的支撑能力,决定了系统的稳定性,数值越高,系统的刚性越强,反之则意味着电网较弱。随着系统传输容量的不断增加,电网强度逐渐减弱,系统整体的稳定性也相应下降。

基于所建立的系统模型,首先针对系统机组总数为100台、构网型机组为50台的场景展开分析。在初始工况下,系统整体传输容量逐步提升。通过特征值分析法观察系统动态特性,图5显示当系统传输容量由0.7 p.u.提升至0.8 p.u.时,电网强度从3.89降至3.53,系统的特征根轨迹出现跨越虚轴的现象,对应的特征值为 $0.09 \pm j3.76$,其虚部分量表明系统发生了频率为0.598 Hz的低频振荡模态。为进一步验证理论分析结果,图6展示了时域仿真对比曲线:当 $t=60$ s时传输容量由0.7 p.u.阶跃至0.8 p.u.,系统随即进入失稳状态,有功和无功功率波形呈现周期性发散。通过快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)对振荡波形进行频谱分析,图7测得主导振荡频率为0.6 Hz,与特征值分析结果高度吻合,证实了理论模型的准确性。

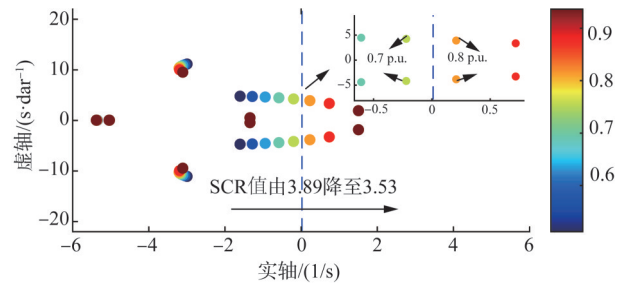


图5 传输容量增加时系统主导模态根轨迹

Fig. 5 Root locus of the system's dominant mode as the transmission capacities increase

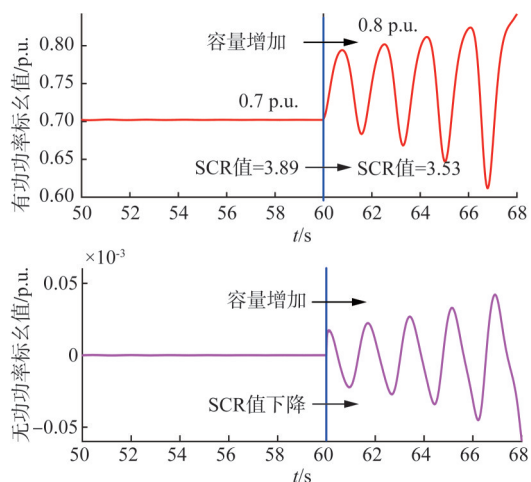


图6 有功和无功功率波形图

Fig. 6 Active and reactive powers waveforms

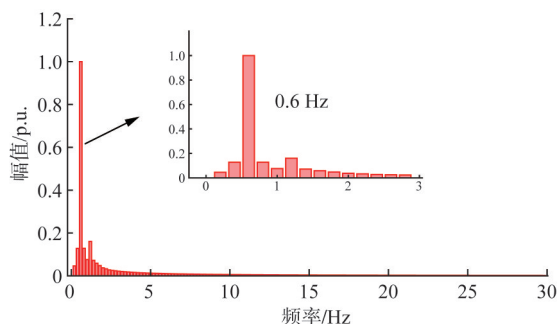


图7 有功功率FFT分析图

Fig. 7 FFT analysis diagram of active powers

2.2 构网容量配置

现有研究表明,在低短路比的新能源外送系统中接入一定比例构网型风机,其电压源外特性可增强电网强度,抑制宽频振荡风险。然而,受限于现有场站改造的工程成本与经济性约束,亟需建立GFM容量占比与系统稳定裕度的量化关系,以确定满足稳定边界的最低GFM容量占比。本研究以系统传输容量0.6 p.u.、换流器总数为100台为基准工况,构网型变流器数量由50台逐渐降低,利用根轨迹法分析构网型换流器容量占比对系统稳定性分析的影响如图8—9所示。

图8根轨迹分析表明,当构网型机组数量减少至37台时,系统出现一对跨越虚轴的特征根($0.07 \pm j4.27$)。仿真结果进一步验证了该特性,图9显示当构网型机组数量降至37台时,系统发生功率振荡,振荡频率约为0.68 Hz,与根轨迹分析结果一致。

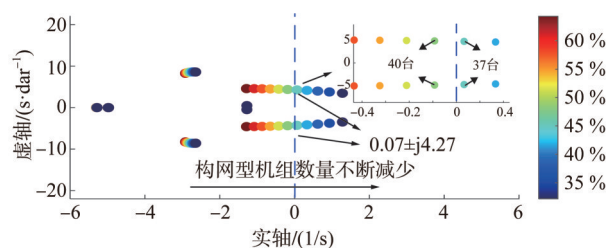


图8 GFM容量占比降低时系统主导模态根轨迹

Fig. 8 Root locus of the system's dominant mode as the GFM capacity ratios decrease

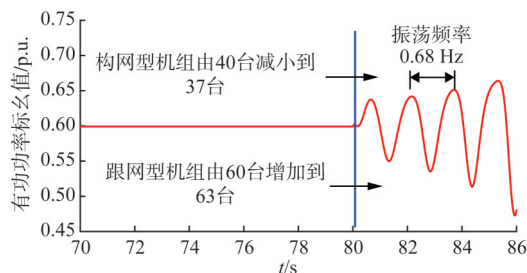


图9 有功功率波形图

Fig. 9 Waveform diagram of active powers

2.3 灵敏度分析

进一步对第2.1节和第2.2节中出现的振荡模态进行参与因子分析,深入剖析各状态变量的作用和灵敏度贡献程度,如图10所示。

通过图10中的灵敏度分析可以看出,当系统传输容量增加或构网型风机容量占比降低时,系统主导参与因子主要集中在跟网型风机锁相环、构网型电压外环以及MMC侧电压外环的相关变量上,这为后续振荡抑制策略的提出提供基础和设计方向。

3 系统振荡抑制策略

3.1 虚拟阻抗控制策略

基于前文主导模态灵敏度分析结果可知,引发系统振荡的主要原因在于跟网型风电机组的锁相环在弱电网环境下容易失稳。进一步,由式(4)可知,电网的强弱程度受传输容量和交流网络阻抗的共同影响。此外,构网型风机与采用V/f控制模式的柔直换流站在电路模型中均呈现电压源外特性,二者之间的联络线路阻抗成为影响多源并联系统稳定性的关键因素。

针对上述问题,本文提出一种基于虚拟阻抗协同优化的电网等效阻抗重塑方法。具体而言,通过在构网型风机与送端柔直换流站的电压外环控制回

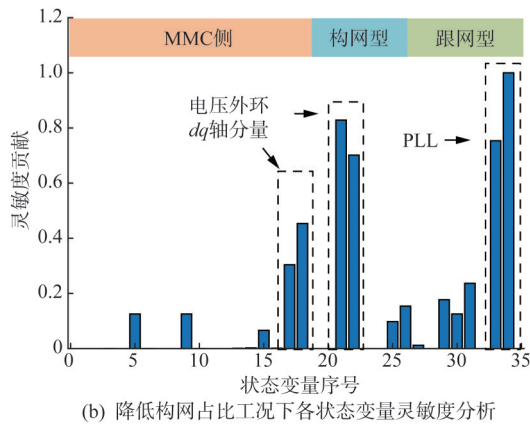
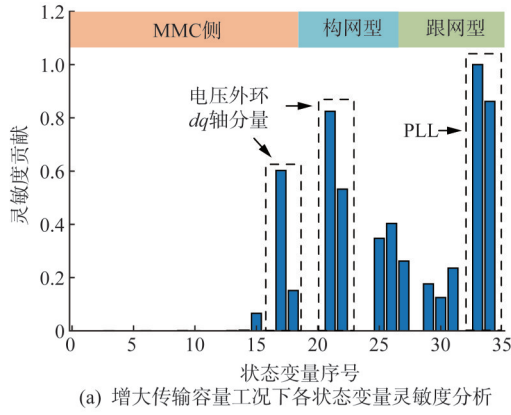


图10 不同工况下各变量灵敏度分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of variables under different operating conditions

路中分别引入负虚拟阻抗与正虚拟阻抗,以重塑二者之间的等效阻抗特性。在构网型风机侧引入负虚拟阻抗后,相当于有效缩短了构网型风机与PCC点之间的等效电气距离,从而增强了构网型等效单机对PCC点电压的支撑能力,有利于提升跟网型场站在弱电网环境中的稳定性,同时也一定程度上降低了构网型风机的容量占比。然而,负虚拟阻抗的引入也会导致构网型风机与送端柔直换流站之间的联络线路等效阻抗降低,可能引发两个电压源之间的振荡。因此,本文进一步在柔直换流站侧额外设计并引入正虚拟阻抗,以有效抑制可能的振荡风险,从而改善系统整体稳定性。

本文采用的虚拟阻抗控制策略控制结构如图11所示。其中,虚拟阻抗 Z_v 可以表示为:

$$Z_v = R_v + j\omega L_v \quad (5)$$

式中: R_v 为虚拟电阻; L_v 为虚拟电感; ω 为工频角频率。

等效后的系统拓扑图如图12所示。

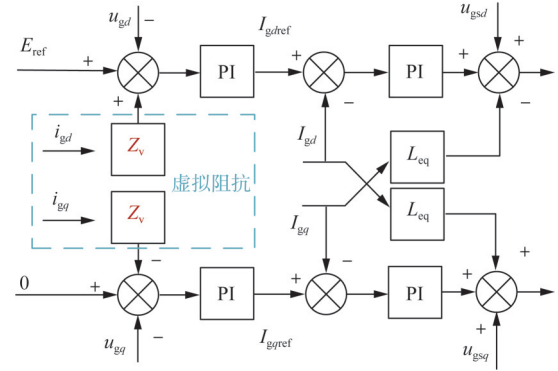


图11 虚拟阻抗控制框图

Fig. 11 Virtual impedance control block diagram

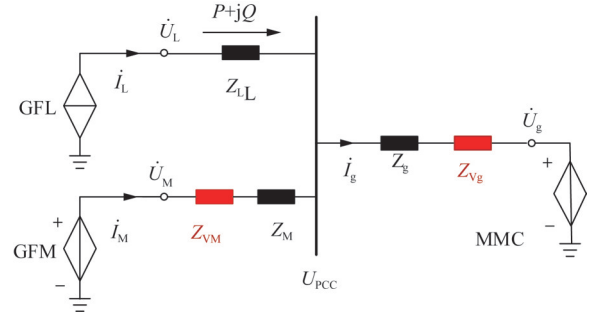


图12 系统等效拓扑图

Fig. 12 System equivalent topology diagram

3.2 稳定性分析

如图11所示,以构网型为例,在引入虚拟阻抗后电压外环的控制信号将修正为:

$$\begin{cases} V_{dref} = E_{ref} - R_v i_d + X_v i_q \\ V_{qref} = 0 - R_v i_q + X_v i_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_{dref} 、 V_{qref} 分别为 d 、 q 轴电压参考值; E_{ref} 为 d 轴电压指令值; R_v 为虚拟电阻; X_v 为虚拟电抗; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流值。

将式(6)代入式(3)可以得到加入虚拟阻抗后改进的小信号模型。基于此模型,通过分别改变系统的传输容量和构网风机容量占比可以深入分析虚拟阻抗对系统稳定性的影响如图13所示。

如图13所示,基于系统特征根轨迹的对比分析表明,在引入虚拟阻抗控制策略后,系统主导模态的特征根实部相比未加入时进一步远离虚轴,该现象表明虚拟阻抗的注入有效增强了系统的正阻尼特性,提高系统稳定性。此外,在未配置虚拟阻抗已处于失稳临界状态的极端工况下,加入虚拟阻抗后仍能保持稳定,并且还能进一步提高系统容量或

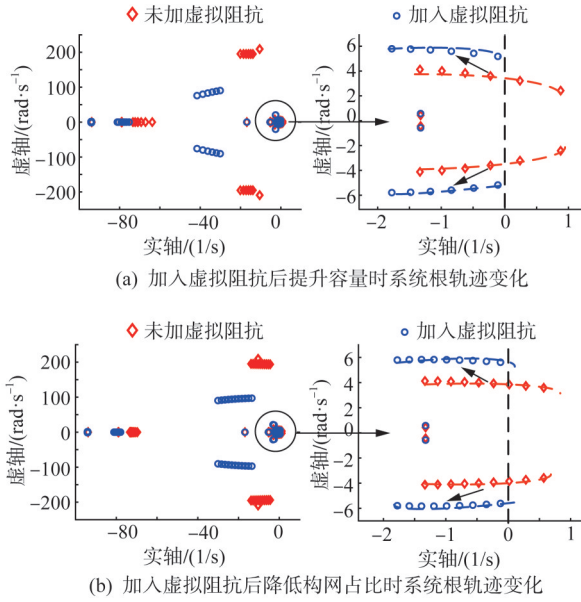


图 13 虚拟阻抗对系统根轨迹的影响

Fig. 13 Impact of virtual impedance on the system's root locus

降低构网型风机的占比。

4 仿真验证

为进一步验证所提虚拟阻抗控制策略的准确性，在 MATLAB/Simulink 中搭建图 1 所示结构对应的仿真模型。

为了确保所设计的虚拟阻抗满足稳定性约束，采用基准值构网型风机侧阻抗实际值 Z_M 和 MMC 侧阻抗实际值 Z_g 分别对构网型风机侧虚拟阻抗设定值 Z_{VM} 和 MMC 侧虚拟阻抗设定值 Z_{Vg} 进行归一化处理。其中， Z_{VM} 从 0.0 p.u. 逐渐变化至 -1.0 p.u.， Z_{Vg} 则从 0.0 p.u. 变化至 1.0 p.u.，并保持二者同步调整。在此过程中，观察系统稳定性的变化情况，以评估不同虚拟阻抗参数对系统稳定性的影响，分析结果如图 14 所示。

图 14 所示的根轨迹说明，当 $|Z_{VM}|$ 和 $|Z_{Vg}|$ 的取值范围限定在 0 p.u. 至 1.0 p.u. 之间时，系统能够保持稳定，超过 1.0 p.u. 后，系统将趋于失稳。这一分析结果为后续虚拟阻抗的设计提供了参考。

4.1 $L_M=L_g=5$ mH 加入虚拟阻抗仿真分析

为了与前文未加入虚拟阻抗的仿真结果形成对比，在分析虚拟阻抗对系统传输容量提升的影响时，仍保持跟网型和构网型机组的数量各为 50 台。同时，在研究虚拟阻抗对构网型风机容量占比降低的影响时，仍以系统传输容量 0.6 p.u. 作为基准工

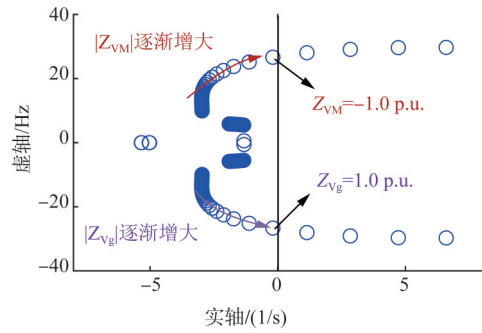


图 14 虚拟阻抗同步变化系统根轨迹变化图

Fig. 14 Root locus plot of the system after adding virtual impedance

况。此时，构网型风机侧与 MMC 侧的电抗设定为 $L_M=L_g=5$ mH。针对虚拟阻抗 $|Z_{VM}|=|Z_{Vg}|$ 依次取 0.25 p.u.、0.5 p.u.、0.75 p.u. 和 1.0 p.u. 进行仿真分析。相应的仿真结果如图 15—16 所示。

通过对图 15—16 中 4 种不同虚拟阻抗工况下的根轨迹及仿真结果进行分析，可以得出以下结论：随着虚拟阻抗 $|Z_{VM}|$ 和 $|Z_{Vg}|$ 的逐步增大，系统传输容量呈现出阶梯式上升趋势，系统可适应的最低短路比阈值下降；同时构网型换流器的容量占比也随着虚拟阻抗的增加而降低。尤其当 $|Z_{VM}|=|Z_{Vg}|=1.0$ p.u. 时，系统整体性能达到最优状态。

这一结果与前文所提出的控制策略设计初衷相符。具体而言，随着 $|Z_{VM}|$ 的增加，构网型风机展现出更显著的负阻抗特性，从而能够更有效地支撑 PCC 点的电网强度。此外， $|Z_{Vg}|$ 的同步调整有助于维持两个电压源之间的稳定性，进一步提升系统的整体运行特性。

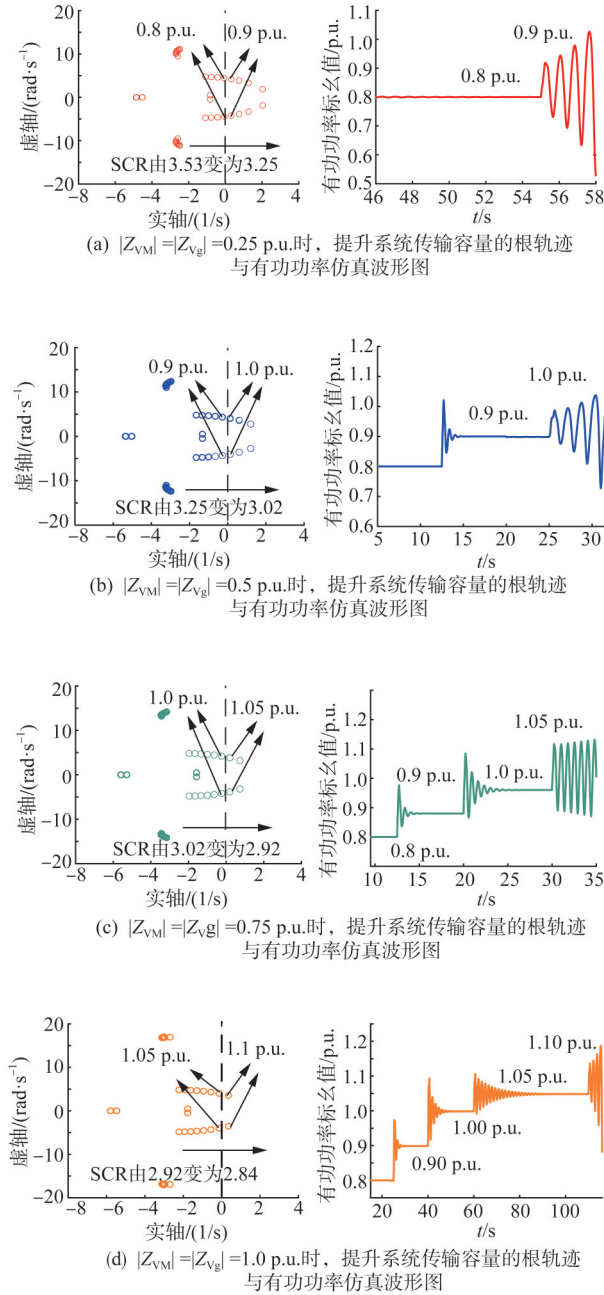
4.2 $L_M=L_g=10$ mH 加入虚拟阻抗仿真分析

为进一步验证虚拟阻抗在不同网络参数情况下的实用性，将构网型风机侧与 MMC 侧的电抗设定为 $L_M=L_g=10$ mH。在此基础上，针对虚拟阻抗 $|Z_{VM}|=|Z_{Vg}|$ ，依次取 0.25 p.u.、0.5 p.u.、0.75 p.u. 和 1.0 p.u. 进行仿真分析。相应的仿真结果如图 17—18 所示。

通过对 $L_M=L_g=5$ mH 和 $L_M=L_g=10$ mH 两种网络参数条件下的仿真结果分析可知，引入虚拟阻抗在提升系统传输容量以及降低构网型风机容量占比方面均表现出显著效果，进一步验证了所提出控制策略的有效性与适应性。

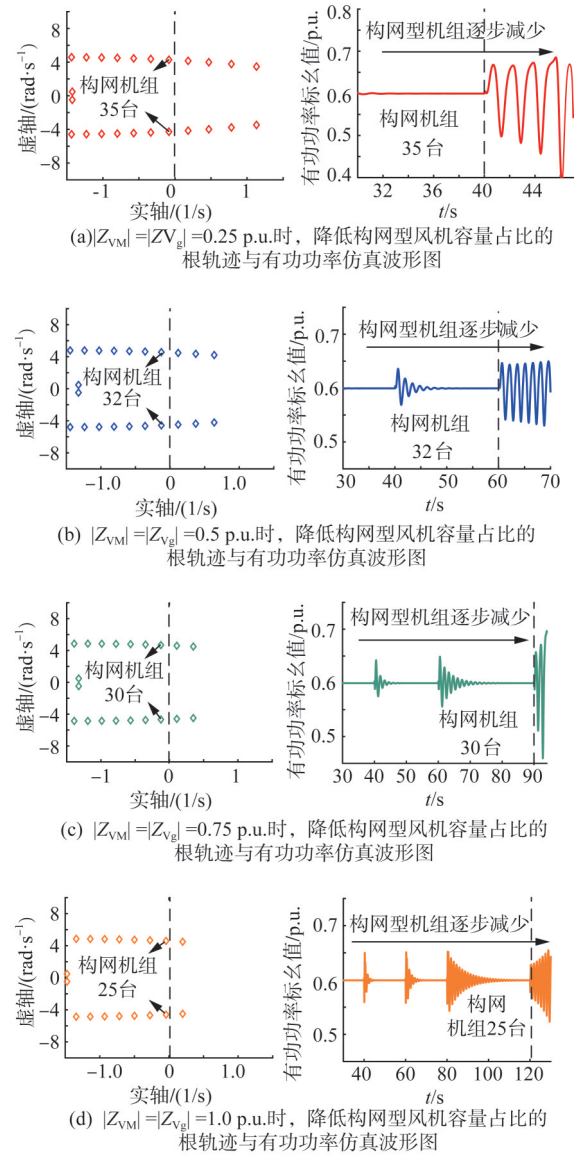
4.3 虚拟阻抗适用性分析

为说明虚拟阻抗在不同风电场规模与线路参数

图 15 $L_M=L_g=5$ mH 时, 虚拟阻抗对系统传输容量的影响Fig. 15 Impact of virtual impedances on system transmission capacity when $L_M=L_g=5$ mH

下的适用。本节针对基准工况 0.8 p. u. 与 $L_M=L_g=15$ mH 网络参数下虚拟阻抗对构网型机组容量提升效果进行对比分析。

将基准工况由 0.6 p. u. 提升至 0.8 p. u. , 风机总台数相应增加至 133 台。此时, 构网型风机侧与 MMC 侧的电抗设定为 $L_M=L_g=5$ mH。针对虚拟阻抗 $|Z_{VM}|=|Z_{Vg}|$, 依次取 0.25 p. u. 、0.5 p. u. 、0.75

图 16 $L_M=L_g=5$ mH 时, 虚拟阻抗对构网型风机容量占比的影响Fig. 16 Impact of virtual impedances on the capacity proportion of grid-forming wind turbines when $L_M=L_g=5$ mH

p. u. 和 1.0 p. u. 进行仿真分析。相应的仿真结果如图 19 所示。由图 19 可得, 构网型风电机组的容量占比随着虚拟阻抗的增加而降低。尤其当 $|Z_{VM}|=|Z_{Vg}|=1.0$ p. u. 时, 系统整体性能达到最优状态。相比传输功率 0.6 p. u. 的基准工况, 构网型风电机组的占比有所提高, 但对比不同虚拟阻抗仿真可得加入虚拟阻抗后仍能降低构网型风电机组占比, 说明了虚拟阻抗在 0.8 p. u. 工况的适用性。

设置 $L_M=L_g=15$ mH, 基准传输容量为 0.6 p. u. , 风机总台数为 100 台。针对虚拟阻抗 $|Z_{VM}|=|Z_{Vg}|$, 依

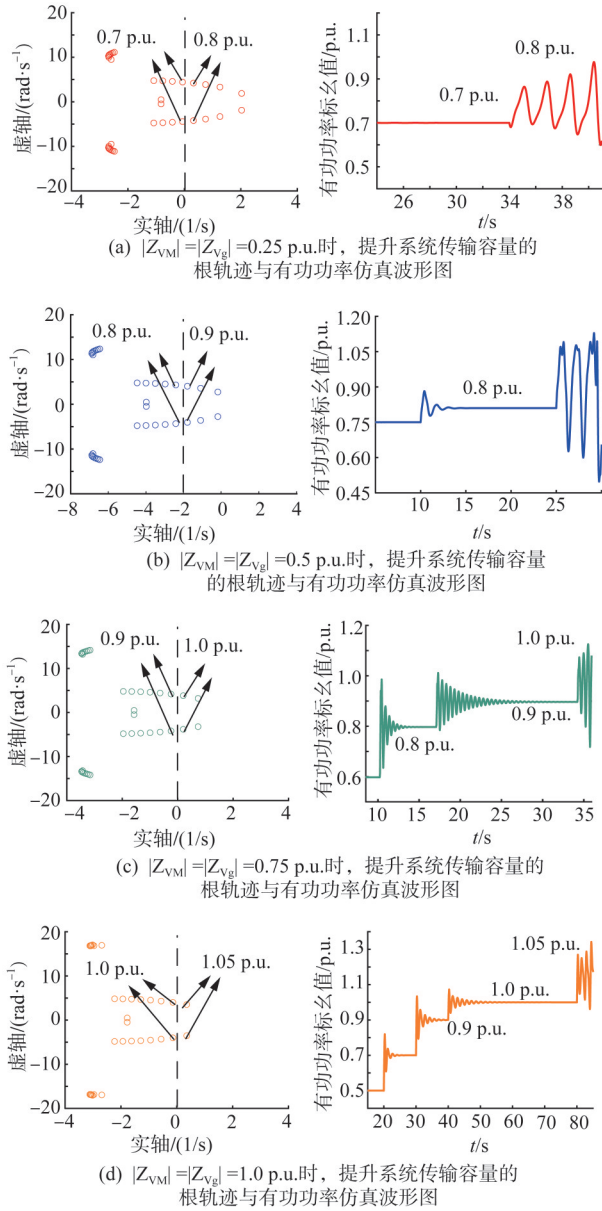


图 17 $L_M=L_g=10$ mH 时, 虚拟阻抗对系统传输容量的影响
Fig. 17 Impact of virtual impedances on system transmission capacity when $L_M=L_g=10$ mH

次取 0.25 p. u.、0.5 p. u.、0.75 p. u. 和 1.0 p. u. 进行仿真分析。相应的仿真结果如图 20 所示。由图 20 可得, 构网型风电机组的容量占比同样随着虚拟阻抗的增加而降低。尤其当 $|Z_{VM}|=|Z_{Vg}|=1.0$ p. u. 时, 系统整体性能达到最优状态。相比 $L_M=L_g=5$ mH 与 $L_M=L_g=10$ mH 的工况, 构网型风电机组的占比有所提高, 且 0.25 p. u. 虚拟阻抗工况仿真显示构网型风电机组比例大于 50%, 表明虚拟阻抗需根据容量与传输线路进行选择。对比不同虚拟阻抗仿真可得加

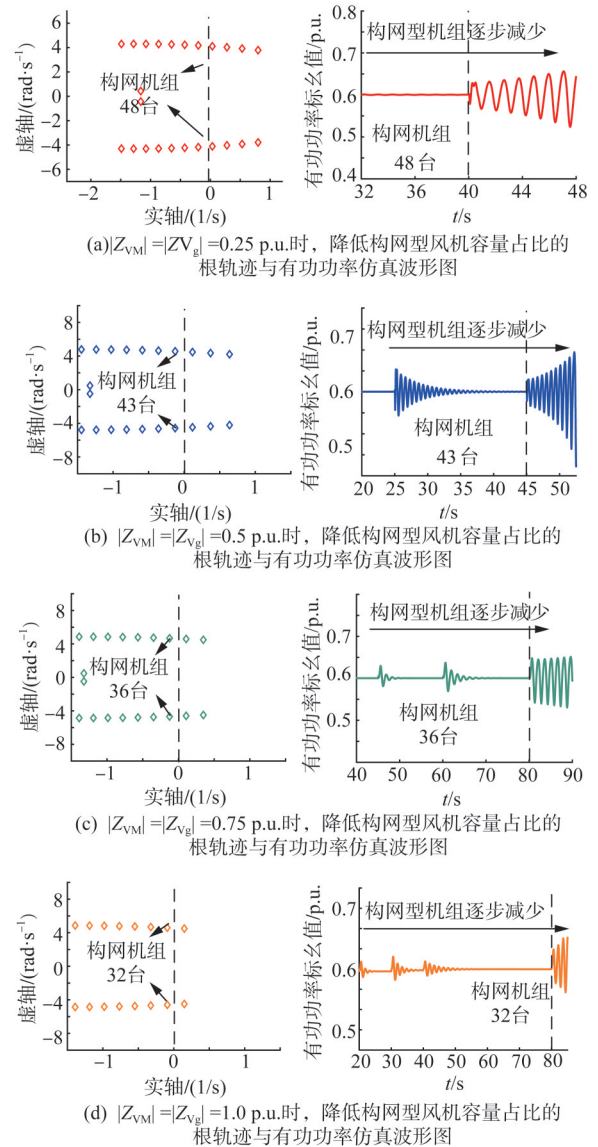


图 18 $L_M=L_g=10$ mH 时, 虚拟阻抗对构网型风机容量占比的影响

Fig. 18 Impact of virtual impedances on the capacity proportion of grid-forming wind turbines when $L_M=L_g=10$ mH

入虚拟阻抗后仍能降低构网型风电机组占比。

5 结论

本文针对跟/构网换流器混联经柔直送出系统, 提出了在构网型及柔直侧的电压外环引入虚拟阻抗控制策略, 旨在提升系统整体的传输容量, 并有效降低构网型换流器的容量占比。主要结论如下。

1) 在提升系统整体容量或降低系统中的构网型换流器容量占比的过程中, 导致系统振荡的主导因子主要集中在构网型换流器与柔直侧电压外环的相

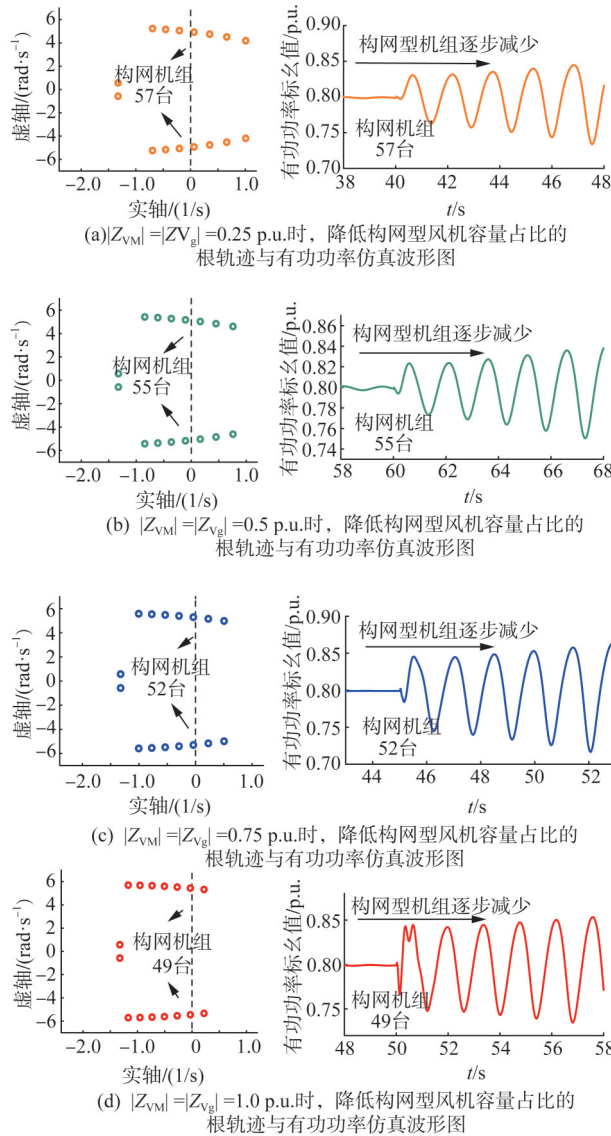


图 19 传输容量为 0.8 p.u. 时, 虚拟阻抗对构网型风机容量占比的影响

Fig. 19 Impact of virtual impedances on the capacity proportion of grid-forming wind turbines when the transmission capacity is 0.8 p.u.

关变量上。

2) 在电压外环引入虚拟阻抗能够调节构网型换流器与柔直换流站两个电压源之间的阻抗特性, 有效提升系统整体稳定性。

3) 虚拟阻抗的大小对系统的运行特性有显著影响。在保证系统稳定的前提下, 适度增大虚拟阻抗可以有效提升系统的整体运行性能, 降低振荡风险。

本文的创新之处在于通过引入虚拟阻抗控制策略以提升跟/构网换流器混联经柔直送出系统的稳

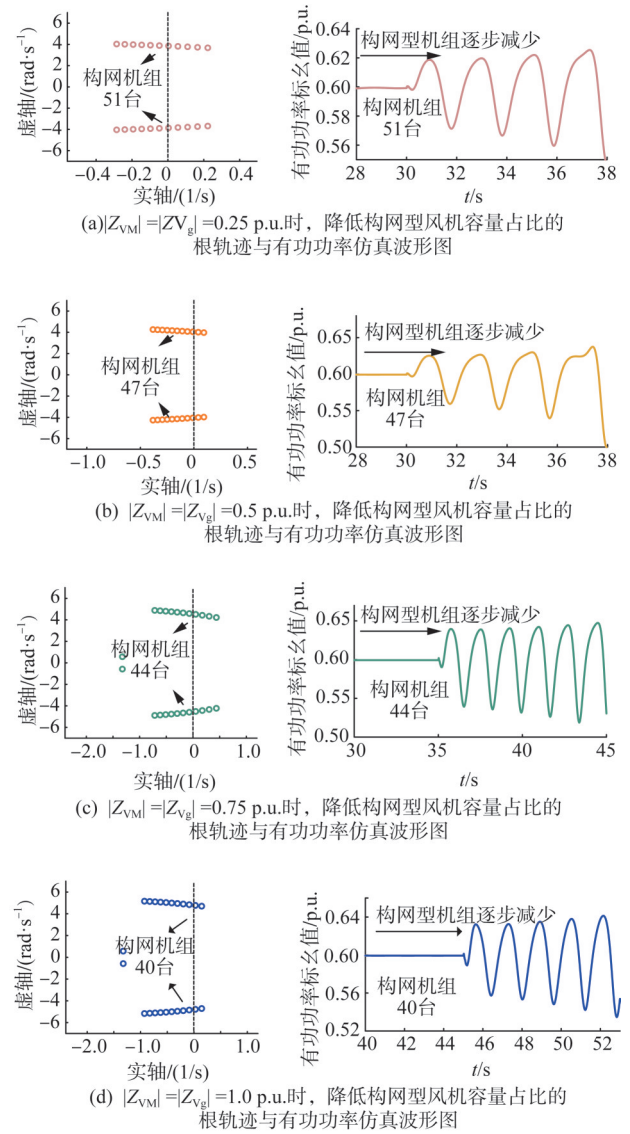


图 20 $L_M=L_g=15$ mH 时, 虚拟阻抗对构网型风机容量占比的影响

Fig. 20 Impact of virtual impedances on the capacity proportion of grid-forming wind turbines when $L_M=L_g=15$ mH

定性, 不足之处在于本文采用的是聚合等效模型, 虚拟阻抗的引入对构网型换流器多机之间稳定性的影响尚待研究。

参考文献

- [1] SHERMAN P, CHEN X, MCELROY M. Offshore wind: an opportunity for cost-competitive decarbonization of China's energy economy[J]. Science Advances, 2020, 6(8): 71-95.
 - [2] 蔡旭, 杨仁焄, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.
- XU Cai, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.

- [3] BRESESTI P, KLING L, HENDRIKS L, et al. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 37 – 43.
- [4] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7 – 13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7 – 13.
- [5] SUMAN D, QIN J, BEHROOZ B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1), 37 – 53.
- [6] 陈武晖, 吴明哲, 张军, 等. 模块化多电平换流器电磁暂态模型研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4755 – 4765.
CHEN Wuhui, WU Mingzhe, ZHANG Jun, et al. Review of electromagnetic transient modeling of modular multilevel converters [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4755 – 4765.
- [7] 马文杰, 张波, 丘东元, 等. 跟网型并网变换器的稳定域重塑控制策略研究综述[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 34 – 51.
MA Wenjie, ZHANG Bo, QIU Dongyuan, et al. Control strategy to reshape the stable region for grid-following converter: an overview [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 34 – 51.
- [8] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893 – 1904, 2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893 – 1904.
- [9] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043 – 4051.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part II: factors affecting transient angle stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043 – 4051.
- [10] ROBERTO R, WANG X, MARCO L, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2(99), 93 – 109.
- [11] 许洁翔, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586 – 3595.
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586 – 3595.
- [12] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339 – 2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339 – 2359.
- [13] GUO J, CHEN Y, WANG L. Impedance analysis and stabilization of virtual synchronous generators with different DC-link voltage controllers under weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10), 11397 – 11408.
- [14] YANG C, HUANG L, XIN H. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4), 3563 – 3573.
- [15] 王奕宁, 向往, 张浩博, 等. 构网型直驱风力发电机组比例优化配置分析[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 490 – 500.
WANG Yining, XIANG Wang, ZHANG Haobo, et al. Analysis of optimal proportion configuration of grid forming direct drive wind turbine [J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 490 – 500.
- [16] 刘朋印, 刘辉, 吴林林, 等. 满足全运行域振荡约束的跟网-构网组合控制及优化配置[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 139 – 146.
LIU Pengyin, LIU Hui, WU Linlin, et al. Grid-following and grid-forming combined control and optimization configuration to satisfy oscillatory constraints across whole operating region [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 139 – 146.
- [17] 罗谢忻, 韩应生, 余浩, 等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 39 – 48.
LUO Shuxin, HAN Yingsheng, YU Hao, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 39 – 48.
- [18] 辛焕海, 王宇轩, 刘晨曦, 等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5463 – 5473.
XIN Huanhai, WANG Yuxuan, LIU Chenxi, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5463 – 5473.
- [19] 张斌, 张学广, 徐殿国. 构网型与跟网型变流器混联并网系统配比关键影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 47 – 58.
ZHANG Bin, ZHANG Xueguang, XU Dianguo. Analysis on key influence factors of ratio of grid-forming and grid-following converters in hybrid grid-connected system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 47 – 58.
- [20] 阳岳希, 贺之渊, 彭程, 等. 海上风电柔性直流外送系统主动支撑技术综述[J]. 高压技术, 2025, 1(14): 48 – 59.
YANG YueXi, HE Zhiyuan, PENG Cheng, et al. Review on grid support control for VSC-HVDC connecting offshore wind farm [J]. High Voltage Engineering, 2025, 1(14): 48 – 59.
- [21] 张舒文, 郭春义, 赵薇, 等. 水光互补柔性直流外送系统的功率传输能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 1(13): 378 – 389.
ZHANG Shuwen, GUO Chun Yi, ZHAO Wei, et al. Research on the power transmission capability of PV-hydro complementary MMC-HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 1(13): 378 – 389.
- [22] 韩估, 苗世洪, 李力行, 等. 基于多视角迁移学习的风场内机群划分及等值风场参数综合优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4866 – 4881.
HAN Ji, MIAO Shihong, LI Lixing, et al. Wind turbines

- clustering in wind farm based on multi-view transfer learning and synthetic optimization of parameters in equivalent wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4866 – 4881.
- [23] 谢小荣, 刘华坤. 风电并网系统次/超同步振荡的分析与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [24] 王健维, 孟建辉, 王毅, 等. 构网型直驱风机的小信号建模及动态频率支撑策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(5): 48 – 58.
- WANG Jianwei, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Small signal modeling and dynamic frequency support strategy of permanent magnetic synchronous generator under grid-forming control [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(5): 48 – 58.
- [25] CHEN W, YU X, HAN X. Analysis of forced SSOs excited by subsynchronous interharmonics from DPMSG-based wind farms [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2), 978 – 989.
- [26] JENNY Z, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5), 2287 – 2296.
- [27] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499 – 515.
- YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499 – 515.
- [28] 杜维, 杜兆斌, 范国晨, 等. 极端天气下考虑分布式电源可用程度的配电网多源协同恢复策略 [J]. 广东电力, 2024, 37(7): 88 – 97.
- DU Wei, DU Zhaobin, FAN Guochen, et al. Multi-source cooperative restoration strategy of distribution network considering availability of distributed generation in extreme weather [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 88 – 97.
- [29] 于琳琳, 贾鹏, 杨游航, 等. 计及短路比约束的新能源场站布点及网架协调规划方法 [J]. 电力建设, 2024, 45(10): 24 – 33.
- YU Linlin, JIA Peng, YANG Youhang, et al. Coordinated planning method for new energy station siting and network considering short circuit ratio constraints [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 24 – 33.

收稿日期: 2025-04-23; 网络首发日期: 2025-12-20

作者简介:

邓晓洋(1989), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为新能源并网技术及电力系统稳定性分析, dengxiaoyang126@126.com;

吴林林(1986), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为新能源并网技术及电力系统稳定性分析, wulin226@163.com;

李立津(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术, 897476606@qq.com。

(上接第11页 Continued from Page 11)

- WENG Limin, ZHANG Guangxiang, JIN Jianfeng, et al. Research on the characteristics of two new types of filters [J]. Power Capacitors, 2000, 29(3): 4 – 8.
- [24] 游中权. 大冶钢厂直流电弧炉C型滤波器特性及计算 [J]. 供用电, 2001, 18(6): 42 – 44.
- YOU Zhongquan. Characteristics and calculation of C-type filter for DC arc furnace at daye steel plant [J]. Distribution & Utilization, 2001, 18(6): 42 – 44.
- [25] 游中权. 直流电弧炉稳弧装置控制特点与C型滤波器特性分析 [J]. 冶金动力, 2001(4): 1 – 3.
- YOU Zhongquan. Control characteristics of arc stabilizing device of DC electric arc furnace and characters analysis of C-type filter [J]. Metallurgical Power, 2001(4): 1 – 3.
- [26] 陶蹇, 刘开培. C型滤波器在混合型有源滤波器中应用及优化 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 39 – 43.
- TAO Qian, LIU Kaipei. Application and optimization of C-type filter in hybrid active power filter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 39 – 43.
- [27] 汪力, 刘忼斌. 大功率整流装置谐波治理中的C型滤波器 [J]. 中国氯碱, 2018(5): 1 – 3.
- WANG Li, LIU Chanbin. C-type filter used for harmonic control in power rectifier plant [J]. China Chlor-Alkali, 2018(5): 1 – 3.

收稿日期: 2025-11-23; 网络首发日期: 2026-01-15

作者简介:

徐政(1962), 男, 教授, IEEE Fellow, 博士, 研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、风力发电技术与风电场并网技术、电力谐波与电能质量, xuzheng007@zju.edu.cn。