



电网技术
Power System Technology
ISSN 1000-3673, CN 11-2410/TM

《电网技术》网络首发论文

题目：大规模风电汇集系统小干扰稳定性研究综述
作者：王一珩，杜文娟，王海风
收稿日期：2021-06-24
网络首发日期：2021-10-18
引用格式：王一珩，杜文娟，王海风. 大规模风电汇集系统小干扰稳定性研究综述[J/OL]. 电网技术.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20211015.0456.003.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

大规模风电汇集系统小干扰稳定性研究综述

王一珺¹, 杜文娟², 王海风^{1,2}

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065)

Research on Small Signal Stability Analysis of Large-scale Wind Power Collection System— An Overview

WANG Yijun¹, DU Wenjuan², WANG Haifeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Alternate Power Systems with New Energy Resources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. School of Electric Engineering Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The large-scale wind power collection system has complex grid structures, a large number of wind turbines, and diverse control systems. It may not only dynamically interact with the series compensation devices, the DC transmission, the weak AC lines, and the synchronous generators of the external power grid, but also exist internal dynamic interactions between wind turbine groups or between different control systems of wind turbines. The in-depth exploration of the generation mechanism, oscillation characteristics, and influencing factors of its small disturbance oscillation are essential to the safe and stable operation of the power system. This paper reviews wind power from two aspects: the small disturbance oscillation caused by the dynamic interaction between the large-scale wind power collection system and the external grid, and the small disturbance oscillation inside the large-scale wind power collection system. The history and main results of the small disturbance stability research of the collection system are reviewed, as well as the advantages and disadvantages of the current main research methods. The future research directions in the field of small-disturbance stability of large-scale wind power collection system are discussed and proposed.

KEY WORDS: large-scale wind power collection system; small signal stability analysis; dynamic interaction; internal mechanism

摘要: 大规模风电汇集系统网架结构复杂、风机数量众多、控制环节多样,既可能与外部电网的串补装置、直流输电、弱交流线路、火电机组发生动态交互,亦可能存在内部风电

机群之间、风机不同控制环节之间的动态交互,深入探究其小干扰振荡的产生机理、振荡特性、影响因素对电力系统的安全稳定运行至关重要。本文从大规模风电汇集系统与外部电网动态交互引发的小干扰振荡、大规模风电汇集系统内部小干扰振荡两个方面梳理回顾了风电汇集系统小干扰稳定性研究的历程和主要研究成果,评析了目前主要研究方法的优势及缺陷,并探讨展望了大规模风电汇集系统小干扰稳定性领域未来的研究方向。

关键词: 大规模风电汇集系统; 小干扰稳定性; 动态交互; 内在机理

0 引言

大规模开发可再生能源是应对化石能源紧缺、践行可持续发展战略的必然选择。风能是当前最具应用潜力、发展最成熟的一种可再生能源,随着国内外电力系统中风力发电比重的持续增长,大规模风电汇集接入已经成为电力系统的发展趋势^[1-3]。截至2020年底,我国风电装机容量已达2.8亿千瓦,约占全国发电装机总容量的12.8%,风电已逐渐成为我国能源结构中的重要组成部分^[4]。

由于风电具有较强的波动性、间歇性,且大规模风电汇集系统集成容量大、外送距离远、相关电力电子装置多,因而含有大规模风电并网的电力系统在小干扰稳定性分析控制方面与传统电力系统存在较大差别^[5-7]。并网风电汇集系统与外部电力系统之间可能发生交互作用,风电汇集系统内部不同风电机组之间亦可能发生交互作用,从而引发电力系统小干扰振荡,严重威胁着电力系统的安全稳定运行、制约着大规模风能的开发利用^[8-9]。近年来,全球范围内已出现多起由风电汇集系统引发的振

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077144)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52077144).

荡事故: 2009 年, 美国德克萨斯州的一处由双馈型风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)组成的风电场与 75%串联补偿线路相互作用引发 20Hz 左右的次同步振荡^[10]; 2011 年, 加拿大布法罗里奇地区的 DFIG 风电场串补系统出现了 9~13Hz 的次同步振荡^[11]; 2012 年, 我国华北沽源地区的大规模 DFIG 风电场发生了由串补装置引起的 6~8Hz 的次同步振荡事故^[12]; 2015 年, 我国新疆哈密地区北部由永磁直驱型风力发电机(direct drive permanent magnet synchronous generator, PMSG)构成的大规模风电场在弱交流电网下出现了 20~80Hz 的次/超同步振荡现象^[13]。这些事故导致风机大面积故障脱网、撬棒电路大量损坏、火电机组轴系扭振断裂, 对系统稳定运行造成了较大影响, 给风机厂商、发电公司和电网公司带来了巨大的经济损失^[14-16]。

针对上述风电汇集系统振荡问题, 学者们采用小干扰稳定性分析方法做出了众多成果。大规模风电汇集系统中风机型号、控制参数、运行方式多种多样, 因而振荡的类型及所使用的分析方法也各不相同^[17]。从参与对象看, 目前针对大规模风电汇集系统小干扰稳定性的研究分为两个大方向: 一是风电汇集系统与外部电网动态交互小干扰稳定性分析, 包括风电汇集系统与线路串补^[12, 18-28]、风电汇集系统与高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)^[29-41]、风电汇集系统与弱交流电网^[42-47]、风电汇集系统与火电机组^[48-56]之间的动态交互引发的小干扰振荡研究; 二是风电汇集系统内部小干扰振荡稳定性分析, 包括风机参数整定不当造成的某元件振荡失稳或某几个元件动态交互^[33, 57-68]以及不同型号的风电机群之间动态交互^[49, 56, 69-71]引发的小干扰振荡研究。用于分析上述问题的方法包括基于模式分析的全阶状态矩阵模式分析法和开环模式分析法, 以及基于频域分析的复转矩系数分析法和阻抗模型分析法。虽然学者们做出了一定的探索, 但目前针对不同场景下风电汇集系统的振荡失稳机理仍未形成共识。

与传统无大规模风电接入下小干扰振荡问题相比, 大规模风电汇集系统引发的小干扰振荡问题更为突出。具体体现在以下三方面:

1) 风电规模的增大对应着风机数量的增多、集电结构的复杂化, 这均可能对系统小干扰稳定性造成不利影响。同时, 大规模风电场还可能出现诸如场内不同机群之间动态交互失稳此类传统系统中无需考虑的振荡问题。

2) 大规模风电汇集系统通常位于偏远地区、需经较长输电线路接入电网, 这导致风电并网方式很可能表现为弱连接, 而研究发现弱连接是导致系统小干扰振荡失稳的重要原因之一。

3) 风电占比增大导致电力系统内换流器数量增多、电力电子化程度加深, 发生换流器动态交互小干扰振荡的风险显著增大, 振荡机理分析与振荡源定位亦更加复杂。

综上, 大规模风电系统小干扰稳定性问题的特点可归纳为: 1) 事故发生频繁, 影响区域较广, 危害性随风电规模的扩大及风电渗透率的升高而增加; 2) 具有多时间尺度动态特征, 频率范围较宽, 所诱发的振荡问题包括低频/次同步/超同步振荡; 3) 发生场景多样, 参与元件众多, 稳定性影响因素各有差别; 4) 形成机制复杂, 建模计算繁琐, 机理探索较为困难。因此, 深入剖析该问题的产生机理及影响因素对于指导风电场规划与设计、应对大规模新能源并网、维护电网的稳定运行等方面均具有重要的理论研究价值和现实指导意义。

本文对国内外近十几年的大规模风电汇集系统小干扰振荡稳定性研究成果进行了梳理, 首先评述了主要的研究方法, 然后分别从风电汇集系统与外部电力系统之间动态交互小干扰振荡稳定性研究和风电汇集系统内部小干扰振荡稳定性研究两方面进行了归纳, 最后提出该领域可能的突破点及未来的研究思路, 以期为大规模风电汇集系统小干扰振荡稳定性的进一步研究提供参考和借鉴。

1 大规模风电汇集系统小干扰稳定性分析方法简介

1.1 全阶状态空间模式分析法

全阶状态空间模式分析法亦称为特征值分析法, 该方法通过建立电力系统的整体状态空间线性化模型并对状态空间矩阵进行模式分析, 直接获得系统的特征值、特征向量、参与因子等信息, 根据这些特征信息辨识出参与主导小干扰振荡模式的系统动态元件, 判定系统的稳定性。

该方法基于严密的状态空间模型理论, 稳定性判断结果通常较为准确, 且可以根据特征信息为消除小干扰振荡提供理论指导, 在大规模风电汇集系统小干扰稳定性分析中取得了广泛的应用。但是由于大规模风电系统状态空间矩阵维数过高, 全阶模型难以搭建且计算效率较低, 导致该方法的工程实用性较差, 在应用时通常需要对系统进行降阶等值处理^[72-74], 而降阶的过程可能会引入一定误差。同

时,该方法无法具体体现动态交互作用与系统稳定性的联系,得出的结论通常基于具体案例,在揭示小干扰振荡的产生机理上存在一定困难。

1.2 开环模式分析法

开环模式分析法是在全阶模式分析法基础上提出的一种改进方法,借鉴了频域分析法子系统分块建模的思路,通过开环子系统的特征信息分析闭环互联系统的小干扰稳定性,一定程度上减小了大规模风电汇集系统振荡模式计算压力,是近年来分析新能源系统小干扰稳定性问题的主流方法之一^[75-76]。该方法将待研究的风电场/风机/控制环节归为一个子系统,系统剩余部分归为另一个子系统,分别建立两个子系统的开环状态空间模型、求解开环振荡模式并对模式谐振条件进行辨识。当两个子系统的一对开环振荡模式在复平面上相近时会发生模式谐振,此时对应的闭环振荡模式会分布在开环振荡模式两侧,通过对闭环模式在复平面上的位置进行估计,判断系统的小干扰振荡稳定性。

该方法基于子系统之间的多输入多输出互联模型,能够从元件动态交互作用的角度揭示风电汇集系统小干扰振荡失稳机理,即发生开环模式谐振是并网风电场与电力系统之间/风机与风机之间呈现强动态交互作用、出现小干扰失稳的根本原因。但该方法只能提供振荡模式的估计值而非准确值,可能会存在一定的稳定性判断误差^[77]。

1.3 复转矩系数分析法

复转矩系数法的基本原理是将系统的电气和机械部分划分为独立模块,以转子角位移增量和转矩增量作为接口量,用两个复转矩系数分别表示电力系统发生小干扰振荡时的等效电气转矩和等效机械转矩^[78]。其中,复转矩系数的实部表示转矩的等效弹性系数,虚部表示等效阻尼系数,通过对这些系数进行频率扫描与数值分析,判断系统在扭振频率下是否存在小干扰失稳风险。传统的复转矩系数法主要针对发电机轴系扭振问题,在风电汇集系统并网引发的火电机组轴系小干扰稳定性分析中应用广泛。近年来,研究者们将该方法改进为更一般的形式,把系统中待研究部分处理成类似机械子系统的前向通道,把其他部分处理成类似电气子系统的反馈通道,用两个子系统间的一对相互作用量作为接口量,从而使该方法适用于更多场景^[79]。

复转矩系数法基于传统动力学中旋转体稳定性判据,物理透明度高,能够给出系统在任一待研究频段上的阻尼特性,解释各参数、各工况对系统小干扰稳定性的影响规律,观察各控制系统的动态

过程。该方法的局限性在于数学理论不够严密,且仅适用于单输入单输出系统的稳定性分析。考虑到电网规模日益增大,如何推广该方法至大规模风电系统的稳定性分析中,还值得进一步的思考。

1.4 阻抗分析法

阻抗分析法是一种研究含有复杂电力电子装置系统稳定性的方法,结合了系统的闭环互联模型和 Nyquist 稳定判据。该方法通常将电力系统划分为待研究开环子系统和剩余部分开环子系统,分别建立两个子系统的频域阻抗模型、得到它们的阻抗函数,之后根据 Nyquist 稳定判据判断系统的稳定性,并可以计算出系统潜在的谐振频率和稳定裕度。常见的阻抗模型分为 dq 域阻抗模型和序阻抗模型两类——分别将阻抗模型建立在旋转的 dq 坐标系下及静止坐标系下^[80-81]。

在研究风电汇集系统小干扰稳定性时,阻抗分析法能够从贡献负电阻的角度揭示系统失稳机理,近年来取得了广泛的应用。然而,基于 Nyquist 稳定性判据的推导证明了系统阻抗为正只是稳定的充分条件而非充要条件^[77],并且该方法的结论是基于参数化仿真分析得出的,虽然可以在一定程度上观测到系统稳定性随各参数变化的趋势,但将风电汇集系统等效为负电阻的原因尚不明确,也难以得到各参数对稳定性的灵敏度信息。此外,多输入多输出阻抗模型的稳定判据也有待进一步探索。

1.5 分析方法比较

从分析准确度、建模复杂度、机理解析能力及适用研究场景四个方面对上述四种方法的优缺点进行整体比较,总结为表 1。

在分析实际问题时,需要基于各方法的优缺点及适用场景找到相匹配的方法。例如在分析大规模风电并网系统与柔性直流输电系统动态交互小干扰稳定性问题时,考虑到电力电子器件众多,全阶模式分析法计算难度较高,而阻抗分析法能够在较准确判断稳定性的同时从负阻抗角度解释失稳机理,因此阻抗法在该问题中得到了更广泛的应用;在分析大规模风电并网引发的同步机轴系振荡失稳时,复转矩系数分析法由于物理意义明确且能够较精确地定位失稳轴系,因而为许多学者所用;在研究大规模风电汇集系统内部机群之间动态交互问题时,考虑到开环模式分析法能够在降低建模难度的同时从动态交互角度解析失稳原因、评估振荡主导元件特性,因而较多研究基于该方法展开。总体来说,四种方法各有所长,由于考虑问题的角度各异,在不同场景中并没有某种特定的方法。现有

研究针对不同问题,基于某一种或几种方法得出了不同的分析结论,将在本文第二、三章节详述。

表 1 分析方法比较

Tab.1 Comparison of different analysis methods

分析方法	准确度	复杂度	机理解析	适用场景
状态空间模式分析法	较高	较高	基于特性信息	各类小干扰振荡问题
开环模式分析法	不精确	适中	从动态交互角度揭示	动态交互引发的振荡问题
复转矩系数分析法	不精确	适中	从贡献负阻尼角度揭示	能够建立单输入单输出模型的场景
阻抗分析法	不精确	适中	从贡献负电阻角度揭示	能够建立单输入单输出模型的场景

2 大规模风电汇集系统与外部电力系统动态交互小干扰稳定性机理分析

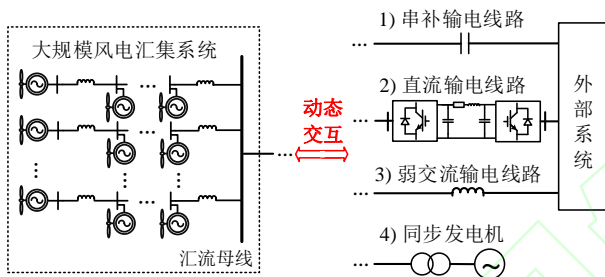


图 1 大规模风电汇集系统与外部电力系统动态交互

Fig.1 Dynamic interaction between the large-scale wind power collection system and external power system

大规模风电汇集系统并网后可能会与外部电力系统发生动态交互,引发小干扰振荡失稳。如图 1 所示,相关研究可分为:1) 风电汇集系统与串联补偿装置动态交互小干扰稳定性研究;2) 风电汇集系统与直流输电系统动态交互小干扰稳定性研究;3) 风电汇集系统与弱交流系统动态交互小干扰稳定性研究;4) 风电汇集系统与同步机动态交互小干扰稳定性研究。由于实际系统中,风电汇集系统与外部电力系统之间的交互作用十分复杂,学者们通常针对图 1 中某一特定的动态过程进行分析,且通常会对大规模风电汇集系统进行一定化简,以期获得初步的研究成果。

2.1 风电汇集系统与串联补偿输电系统动态交互

风电汇集系统与串联补偿输电系统曾发生过两次较为严重的交互振荡事故,分别为 2009 年美国德克萨斯州次同步振荡事故(约 20Hz)以及 2012 年我国河北沽源次同步振荡事故(约 6~8Hz)。由于这两次事故所涉及的风电场均以 DFIG 为主要机型,且发生振荡的频率均在次同步范围内,因此国内外学者对 DFIG 风电场经串补输电并网系统的次同步振荡稳定性问题展开了大量的研究。

文献[12, 18-25]基于频域分析法和模式分析法研究了 DFIG 风电场-串补系统小干扰振荡问题。文献[18-19]建立了 DFIG 风电场-串补系统状态空间模型,发现由于风机轴系的固有扭振频率较低(<3 Hz),DFIG 轴系与串补间的扭振现象在非常高的串补度下才会被激发,因此风机与串补之间主要表现为感应发电机效应(inductive generator effect, IGE),并且指出风速、串补度以及风机电流控制内环增益均对这种现象下的稳定性有着显著的影响。文献[20-21]进一步构建了 DFIG 风电场-串补系统的 RLC 等值模型,将次同步振荡归因于 DFIG 在谐振频率下表现出的负阻抗特性,并应用 Nyquist 判据分析了串补度、风速、转子侧换流器(Rotor Side Converter, RSC)对稳定性的影响。文献[12, 22-23]基于沽源事故建立了 DFIG 风电场-串补系统 RLC 电路模型,根据电路参数定量分析了事故中的次同步振荡特性,发现风电场内不同位置的风机均处于同一振荡模式,且振荡频率可能会随着时间的推移以及网络拓扑、风机数量等因素的变化而变化。文献[24]构建了考虑 DFIG-串补系统详细模型的 26 阶状态矩阵,通过计算特征值、阻尼比、参与因子较为全面地分析了该系统可能存在的振荡模式,指出主要存在高频振荡模式、轴系振荡模式以及由固定串补与 DFIG 换流器相互作用引起的次同步控制相互作用模式,并分析了控制器参数及串补度对不稳定振荡模式的影响。文献[25]基于阻抗模型研究了当 DFIG 风电场并入含串/并联电容补偿的弱电网时可能出现的次/超同步现象,发现 DFIG 并入串补弱电网易引发次同步振荡、并入并补弱电网易引发超同步振荡,并且指出风机并网变压器的结构和风电场规模均对这两种振荡影响显著,而转子转速和电流环控制参数仅会影响次同步振荡特性。

此外,还有部分研究聚焦于 PMSG 风电场-串联补偿系统小干扰振荡稳定性。文献[23]的研究发现对一个同时包含 PMSG 和 DFIG 的风电-串补系统,PMSG 并不会主动激发系统振荡,而是被动参与到 DFIG-串补交互振荡过程中。然而,文献[26]的电磁暂态仿真结果表明虽然 PMSG 的换流器结构使得其轴系不会与串补发生动态交互,但其网侧换流器(grid side converter, GSC)在有功功率控制或交流电压控制下仍可能会与串补动态交互、引发次同步振荡。文献[27]建立了 PMSG 风电场-串补系统导纳模型,基于广义 Nyquist 稳定判据指出 PMSG 可能在次同步振荡频段内呈负电阻,且锁相环(phase-locked Loop, PLL)和无功功率控制的带宽、

串补度、风机输出功率均对次同步振荡稳定性有着较大影响。文献[28]在[27]的结论上进一步基于模式分析法和阻抗分析法研究了 PMSG 是否会与串补发生动态交互,发现在弱连接条件下 GSC 振荡模式和线路 LC 谐振模式可能会发生动态交互,串补度的增大会加剧这种交互作用,且 GSC 控制参数、PLL 参数和电网强度均会影响系统稳定性。

以上文献从不同角度较为全面地分析了风电汇集系统与串补输电系统动态交互引发的小干扰振荡稳定特性,总结如下:

1) 由于 DFIG 轴系难以与串补发生动态交互,目前的研究一致认为 DFIG 风电场-串补系统的小干扰振荡是一种没有轴系参与的感应发电机效应。一些文献从阻抗角度将这种现象解释为并网 DFIG 风电场在某些特定条件下表现出的“负电阻效应”,另一些文献从模式分析角度将其解释为风机与串补动态交互导致的模式阻尼下降。串补度、风速、风机控制器参数、风机数量、风电汇集系统网络拓扑均对稳定性有着明显的影响。

2) PMSG 风电场是否会与串补发生动态交互仍未得到统一的结论,部分研究认为 PMSG 不会主动激发小干扰振荡,另一部分研究指出 PMSG 控制器振荡模式和线路 LC 谐振模式可能会发生动态交互,此时串补度、风机控制参数、电网强度、风机输出功率均是影响系统稳定性的重要因素。

2.2 风电汇集系统与直流输电系统动态交互

2014 年德国北海 PMSG 风电场经柔性直流输电并网工程发生谐振事故^[29],自此出现了大量关于风电场-柔直系统小干扰振荡稳定性的研究。文献[30]通过建立 PMSG 风电场-柔直系统的传递函数模型,在 Nyquist 频域图中分析了风机与柔直的谐振点,指出系统功率振荡是由风机换流器与柔直整流器相互作用引起的。文献[31-32]建立了 PMSG-柔直系统的状态空间模型及接口动态模型,发现系统中同时存在低频、次/超同步、高频振荡模式,稳定性关键影响因素包括换流器控制参数、直流线路参数及柔直受端电网短路比。文献[33]通过模式分析指出 PMSG 风电场-柔直系统中同时存在风电场内振荡模式及风电场与柔直动态交互场网振荡模式,其中场网模式主要受风机 GSC 直流电压控制环节和柔直送端整流器 d 轴交流电压控制环节的影响。文献[34]建立了 PMSG 风电场-柔直系统的单输入单输出模型,基于 Nyquist 稳定判据指出该系统存在低频振荡失稳风险,且风电场 PLL 控制带宽及柔直换流站定交流电压控制对系统稳定性有着

较大影响。文献[35]建立了考虑柔直内部动态过程及 PLL 动态过程的线性化数学模型,基于振荡模式根轨迹分析了有功功率、控制器参数、等效电阻对稳定性的影响,指出系统次同步振荡主要与柔直和风机的 q 轴控制参数有关。

DFIG 风电场与柔直系统的交互机理也尚处于探索阶段。文献[36]建立了海上 DFIG 风电场经柔直并网系统的线性化模型,指出系统中可能存在两种次同步振荡,分别为风机轴系扭转振荡、风机与柔直换流器控制装置之间相互作用引发的振荡,这两种振荡均与 RSC 电流控制内环参数及风轮转速有关。文献[37]通过建立 DFIG 风电场-柔直系统阻抗模型,发现在次同步振荡频段上 DFIG 表现出负电阻性质、柔直变流器表现出正电阻性质,二者构成等效负电阻谐振电路进而引发次同步振荡。文献[38]基于转矩法指出柔直系统通过电磁转矩实现对 DFIG 风电场的耦合,这种耦合作用使得 DFIG 电磁转矩表现出负阻尼特性,进而引起系统次同步振荡。针对国内某柔直输电示范工程调试过程中出现的 DFIG 风电场经基于模块化多电平换流器(modular multilevel convertor, MMC)的柔性直流并网引发的次同步振荡^[39],文献[40-41]搭建了海上 DFIG 风电场经 MMC-HVDC 并网电力系统的小信号阻抗模型,并基于 Nyquist 稳定判据进行了稳定性分析,发现 MMC 的交流侧小信号阻抗存在谐振峰,DFIG 风电场有功输出提高时会对该谐振的阻尼造成不利影响,并且 MMC-HVDC 环流控制参数对系统的次同步振荡稳定性影响显著。

综上,风电汇集系统与直流输电系统动态交互引发的小干扰振荡研究现状总结如下:

1) 由 PMSG/DFIG 构成的风电汇集系统均可能与直流输电系统发生动态交互,引起小干扰振荡失稳。由于风电汇集系统与直流输电系统各自含有变流器,涉及数量庞大的控制环节,因而它们之间的动态交互比较复杂,且影响因素包括各换流器控制参数、直流线路参数、风电场运行参数等,分析起来较为困难,尚缺少解析性的研究结论。

2) 基于模式分析法的研究发现风电汇集系统-直流输电系统中可能同时存在多种频段的振荡模式,现有研究认为这是由于风机换流器与柔直整流器相互作用引起的,但对于主导振荡模式的控制环节尚存在不同的观点;基于阻抗分析法的部分研究认为在次同步振荡频率上风机会表现出负电阻性质,另一部分研究认为直流输电系统会表现出负电阻特性,亦未形成统一的结论。

2.3 风电汇集系统与弱交流系统动态交互

当外部电力系统中不含串补或柔直输电时,风电汇集系统并网仍然可能引发小干扰振荡。2014年起,我国新疆哈密地区大规模 PMSG 风电场并入无串补交流输电系统被监测到多次频率在 20~35Hz 之间的次同步振荡;2015 年,该地区发生了较为严重的次同步振荡事故,造成功率损失 128 万千瓦。自此,风电场经远距离输电线路并入交流电网引发的小干扰振荡问题激起了学术界广泛的关注,文献[42-47]从风电汇集系统与弱交流输电系统之间动态交互的角度对这一现象进行了分析。

文献[42-43]采用阻抗分析和模式分析相结合的方式研究了哈密地区风电场次同步振荡事故的发生机理,将系统失稳归因于振荡频率下的等效负电阻效应,指出当 PMSG 风电汇集系统并入弱交流电网时二者间的交互作用会产生一个弱阻尼次同步振荡模式,并且发现系统稳定性与电网强度、风机容量和数量、换流器控制结构和参数均强相关。文献[44]同样将 PMSG 风电场-弱电网系统出现次/超同步振荡的机理归为 PMSG 在振荡频段呈现的负电阻容性阻抗与电网等效电感的串联谐振,指出风机与电网的弱连接、风机 PLL 等环节参数设置的不合理均可能加剧系统小干扰振荡失稳风险。文献[45-46]采用阻抗分析法研究了 PMSG 风电场-弱交流系统的宽频振荡产生机理及抑制措施,结合最大峰值 Nyquist 稳定判据指出多控制器/环节的重叠效应导致系统在各频带内表现出容性负阻尼特性,与相位呈感性的交流电网交互引发宽频振荡,且引起不同频带振荡的控制器/环节各不相同。针对 DFIG 风电场-弱交流电网,文献[47]基于导纳模型的广义 Nyquist 稳定判据讨论了 DFIG 风电场与弱交流电网之间的交互作用,从负导纳的角度分析了风机控制参数和电网强度对系统次同步振荡稳定性的影响,发现弱电网情况下 DFIG 电流环及 PLL 比例系数的增大会使得系统稳定性下降。

根据上述文献可以看出:

1) PMSG/DFIG 风电汇集系统均可能与弱交流电网形成动态交互。现有研究大多将风电汇集系统与弱交流电网的交互机理解释为并网风电场的负阻抗/负导纳效应,此时系统的稳定性受到电网连接强度、风电场输出功率、风机数量及控制参数等诸多因素的影响。

2) 目前关于风电汇集系统与弱交流电网动态交互引发系统小干扰振荡失稳的研究大部分基于算例分析,缺乏对内在机理和一般化规律的揭示,

弱连接条件下系统存在弱阻尼/负阻尼振荡模式的机理尚不明确。

针对风电汇集系统并入弱交流电网引发的小干扰振荡事故,亦有不少文献将其机理归为风电系统因自身参数设置或运行工况的不合理而出现的某种内部弱阻尼/负阻尼振荡模式,该模式并非直接由风电系统与外部弱交流电网交互引起,弱连接条件只是导致了模式阻尼的进一步恶化。本文将在 3.1 节中对相关研究进行归纳。

2.4 风电汇集系统与同步发电机动态交互

在哈密事故中,距风电场 300 公里外 3 台大型火电机组亦被诱发了次同步扭振,因而不少研究对 DFIG 风电汇集系统^[48-52]/PMSG 风电汇集系统^[53-56]与火电机组之间动态交互的产生机理进行了剖析。

文献[48-49]基于模式分析法研究了 DFIG 风电场并网前后火电机组轴系扭振模式的变化,指出风电并网会降低同步机轴系次同步振荡阻尼,其中文献[48]通过计算扭振模式阻尼的灵敏度分析了风电场有功功率和无功功率对同步机次同步振荡阻尼的影响,文献[49]从开环模式谐振的角度着重分析了风机 RSC 控制参数对同步机轴系稳定性的影响。文献[50]提出了一种用于研究 DFIG 并网激发同步机轴系次同步振荡的改进复转矩系数法,从阻尼转矩角度得到了和文献[48-49]类似的结论,即并网 DFIG 会向同步机轴系注入负阻尼转矩,导致轴系阻尼缺失从而振荡失稳。文献[51]在文献[50]的研究基础上进一步从阻尼角度分析了分散式多风电场与多机电力系统的动态交互过程及转矩传输通道,指出风机控制参数、风机运行功率、风机台数及风电场并网位置的不合理均可能导致火电机组轴系失稳。文献[52]通过模式分析法研究了电网连接强度对 DFIG 风电场并网引起的火电机组轴系扭振的影响,发现 DFIG 机组的 PLL 和直流电压控制环节均可能与同步机轴系发生动态交互,且弱连接条件下这种交互作用会增强。

文献[53]结合复转矩系数法和时域仿真分析了 PMSG 风电场对火电机组振荡稳定性的影响机理,推导了 PMSG 输出功率与火电机组次同步振荡阻尼的关系,并提出了一种在 PMSG 的 GSC 控制系统无功外环处附加阻尼控制的火电机组次同步振荡抑制方法。文献[54-55]基于开环模式分析法研究了 PMSG 风电汇集系统中风机 PLL 控制对火电机组机电低频振荡/轴系次同步振荡的影响,发现当 PLL 开环振荡模式与同步机机电/轴系开环振荡模式在复平面上相互接近时,PMSG 与同步机之间的

动态交互作用增强,进而导致系统小干扰稳定性降低。同样基于开环模式谐振理论,文献[56]分析了PMSG的GSC直流电压控制外环与同步机轴系之间的次同步动态交互,发现参数调整不当时二者的强交互会导致风电并网系统稳定性遭到破坏,通过调节风机控制参数可以有效消除失稳风险。

通过以上梳理可以得出如下结论:

1) DFIG/PMSG 风电汇集系统均可能在并网后与火电机组发生动态交互,引发同步机轴系扭振或机电低频振荡,且风电系统的有功功率、无功功率、风机控制参数、风机台数、并网连接强度等因素均会影响火电机组的振荡稳定性。

2) 现有文献大多基于复转矩分析法或模式分析法,从风电汇集系统向同步发电机轴系注入负转矩/负阻尼的角度揭示了风电并网导致火电机组小干扰失稳的机理,得到了相对一致的结论,但风电系统产生负转矩/负阻尼的原因还缺乏深入研究。

2.5 风电汇集系统与不同外部电力系统动态交互分析方法和产生机理比较

对大规模风电汇集系统与四种外部系统动态交互小干扰稳定性问题的分析方法以及基于不同方法得出的机理结论进行总结对比,如表2所示。

表2 风电与外部系统动态交互小干扰稳定性机理比较
Tab.2 Mechanism comparison of small signal stability of dynamic interactions between wind power collection system and different external systems

外部系统	分析方法	产生机理
串补系统	模式分析法	风电与串补交互导致模式阻尼下降
	频域分析法	并网风电系统负电阻效应
直流系统	模式分析法	风电与柔直交互导致模式阻尼下降
	频域分析法	风电系统或直流系统负电阻效应
弱交系统	模式分析法	风电与弱电网交互导致模式阻尼下降
	频域分析法	并网风电系统负电阻效应
同步机	模式分析法	风电与同步机交互导致的模式阻尼下降
	频域分析法	风电向同步机轴系注入负转矩/负阻尼

可以看出,以上四种问题在分析方法和产生机理上存在相似之处,均可采用模式分析法和频域分析法进行研究,且从模式分析的角度,均将振荡失稳原因归于动态交互引起的阻尼下降;从频域分析角度,均将失稳解释为系统负电阻/负转矩现象。同时,风电汇集系统的网络拓扑、输出功率、风机数量、风机换流器参数、外送线路阻抗等因素均会对四种场景下的小干扰稳定性产生较大影响。

此外,四种问题的产生机理也存在一定区别,风电-串补系统和风电-弱交流系统的失稳环节为风

电,风电-同步机系统的失稳环节通常为同步机,风电-柔直系统的失稳环节可能为风电、也可能为柔直输电系统。四种问题的分析手段亦各有侧重,如复转矩系数法被广泛应用于风电与同步机动态交互小干扰稳定性研究,而在其他三种问题中该方法的应用较少。

3 大规模风电汇集系统内部小干扰稳定性机理分析

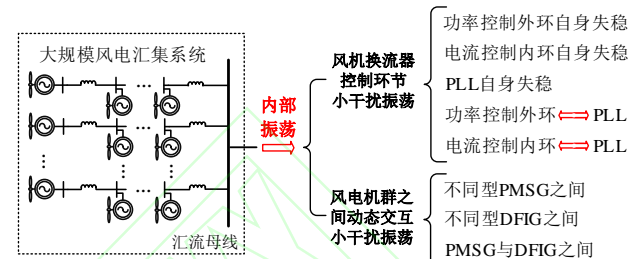


图2 大规模风电汇集系统内部小干扰振荡

Fig.2 Small disturbance oscillation inside large-scale wind power collection system

前一节归纳了风电汇集系统与外部电力系统发生动态交互的几种情形,而另有一些研究发现,由于风机换流器之间存在复杂的耦合作用,大规模风电汇集系统还可能存在着以下两种内部小干扰失稳情况,如图2所示:1)当参数设置不合理时,风机的某一种或某几种控制环节对应的振荡模式可能会出现弱阻尼或负阻尼,导致风电汇集系统内部振荡失稳;2)当风电汇集系统内包含几种不同型号的风电机群时,风机之间可能会出现动态交互,引发小干扰失稳。当风电汇集系统并入弱交流电网时,上述情形的稳定性可能会被恶化。近年来,不少文献针对上述问题展开了深入探究。

3.1 同型风机汇集系统内部小干扰稳定性

在分析同型风机构成的风电汇集系统因某一个或某几个动态环节引起的稳定性问题时,现有文献大多先将风电场等值处理为一台或几台风机,以便更为清晰地辨识出导致系统失稳的环节^[72-74]。可能引发风电汇集系统小干扰振荡失稳的风机动态元件主要包括^[82]:1)风机换流器功率控制外环;2)风机换流器电流控制内环;3)风机PLL。此外,PLL与风机换流器内、外环的动态交互均可能引发系统振荡失稳^[83-85],而风机换流器内、外环之间由于控制回路的动态响应时间相差十倍左右,通常难以产生相互耦合^[86]。

文献[33, 57-59]针对风电汇集系统中风机换流器功率控制外环稳定性及其与PLL之间的动态交互稳定性展开了研究。文献[57-58]基于DFIG降阶

模型的模式分析和改进模型的复转矩分析研究了直流电压控制系统小干扰稳定性,结果表明 PLL 振荡模式、RSC 的有功/无功控制外环振荡模式为直流电压时间尺度下的主要振荡模式,在弱连接条件下 PLL 和 RSC 控制外环之间的相互作用会破坏直流电压系统稳定性,且连接强度越弱、这种交互作用越强烈。针对 PMSG 风电汇集系统,文献[59]基于降阶状态空间模型分析了风机 GSC 功率控制外环与 PLL 之间交互作用造成的风电并网系统失稳机理,推导了 PMSG 风电场的小干扰稳定极限,从解析角度指出风电外送负荷增大、场内风机数量增加及连接程度减弱均可能导致风电汇集系统小干扰振荡失稳风险增大。文献[33]在研究多 PMSG 经柔直输电并网系统的次同步振荡问题时,通过模式分析发现系统中存在一个同型风机之间相互作用产生的风电场场内振荡模式,该模式主要受风机 GSC 直流电压控制环节的影响,且该场内振荡模式和场网振荡模式对于 PMSG 参数的变化阻尼耦合趋同,因此可以通过优化 PMSG 参数同时抑制场内模式和场网模式。

文献[60-63]研究了风机换流器电流控制内环稳定性及其与 PLL 之间的动态交互稳定性。文献[60]通过状态空间分析法研究了由变速风机组成的风电场在弱连接下的动态特性,指出系统失稳因 PLL 与电流环之间的交互引起,电网强度太弱、电流控制带宽过高或过低、PLL 带宽过高均可能导致系统失稳。文献[61]推导了考虑 GSC 电流控制内环及 PLL 的 PMSG 解析模型,发现当 GSC 输入输出谐波相位满足一定关系时会出现次/超同步振荡,且振荡强度和振荡频率与电流内环参数、PLL 参数、电网强度等因素相关。文献[62-63]基于复转矩模型对低电压穿越故障中 DFIG/PMSG 风电汇集系统的小干扰稳定性进行了分析,发现弱连接情况下 PLL 与电流控制内环之间的动态交互对系统稳定性的影响突出,风机换流器控制环节会向 PLL 振荡模式提供负阻尼,且二者带宽越接近,交互作用越强烈。

此外,文献[64-68]指出 PLL 自身参数整定不当亦有可能引发风电汇集系统小干扰振荡失稳。文献[64-67]针对并网 DFIG 风电场分别建立了并联降阶小信号模型、复转矩模型及单机等值模型,指出与 PLL 相关的风电场共模模式是系统的主导振荡模式,该模式的阻尼随着风电并网点短路比的降低、PLL 控制增益的减小、负载的增加而降低。其中,文献[66]认为 DFIG 输出有功功率与端电压幅值之间的耦合联系会在锁相控制回路上引入一条额外

的正反馈支路,在弱连接条件下该支路增益较大,进而导致风电系统失稳。文献[68]通过建立大规模并网 PMSG 风电场降阶等值模型,从解析角度分析了弱连接条件下由 PLL 动态主导的小干扰失稳机理,推导出的临界稳定判据表明交流电网强度减弱、风电场网络结构改变以及 PLL 积分控制系数增大均可导致 PLL 动态主导的并网 PMSG 风电系统小干扰稳定性降低。

通过上述对不同环节主导的大规模风电汇集系统内部小干扰稳定性的研究可以看出:

1)由同型 DFIG/PMSG 构成的风电汇集系统中各风机换流器功率控制外环、电流控制内环及 PLL 均存在发生小干扰失稳的风险,这可能由于各环节自身参数整定不当导致(如 PMSG 的 GSC 功率控制外环参数整定不当、PMSG/DFIG 的 PLL 控制参数整定不当),也可能由于不同环节之间的动态交互引发(如 PMSG/DFIG 功率控制外环与 PLL 动态交互、PMSG/DFIG 电流控制内环与 PLL 动态交互),且风电汇集系统并网连接强度、风机控制参数、风电外送负荷等因素均会对稳定性造成一定的影响。

2)由于风电汇集系统内部各控制环节存在时间尺度差异,因而对应的小干扰振荡模式的频带较宽。虽然文献[33, 57-68]通过模式分析和频域分析对不同频段内的小干扰振荡稳定性进行了探究,但仍难以解释这一问题的本质,亦难以揭示弱连接条件导致系统稳定性降低的根本原因。

3.2 不同机群之间动态交互稳定性

由于大规模风电汇集系统的典型特点是分期建设,因而其中常常同时存在几种不同型号或处于不同运行状态的风机,在参数整定不当时,这些风机之间可能发生动态交互,引发小干扰振荡。目前,对这一问题的研究相对较少。

文献[49, 56, 69]基于开环模式理论分别研究了 PMSG 及 DFIG 风电汇集系统内部不同型号风机间的动态交互,将不同型的风电机群划分为不同的开环子系统:文献[56]发现不同 PMSG 的 GSC 有功电流内环振荡模式之间会发生开环模式谐振,引发系统超同步振荡;文献[69]发现不同 PMSG 的 PLL 之间、不同 PMSG 的 PLL 及 GSC 直流电压控制环节之间均可能发生开环模式谐振,引发次同步振荡;文献[49]发现不同 DFIG 的 RSC 有功电流控制内环之间会发生开环模式谐振,引发系统次同步振荡。这三篇文献都证实了这种次/超同步振荡可以通过调节参与开环模式谐振风机的相关控制参数来消除。文献[70]在提出一种大规模风电汇集系统振荡

源定位方法的同时,基于等值降阶模型发现不同型号DFIG的RSC有功功率控制外环之间可能发生动态交互、引发次同步振荡,这种振荡同样能够通过参数调节消除。文献[71]从多模式谐振角度研究了DFIG风电汇集系统中不同风电机组之间的动态交互,发现在参数设置不当时,各风机RSC无功功率控制外环参与主导的振荡模式的阻尼随着风电规模的扩大而减弱,不仅可能引发系统次同步振荡失稳,还可能出现振荡“频率漂移”现象。

综合以上研究成果可知:

1) 风电汇集系统内部不同型号机群之间亦存在发生动态交互、引发小干扰振荡失稳的可能性。根据现有研究,存在交互风险的风机环节包括不同DFIG的RSC电流控制内环、不同DFIG的RSC有功/无功控制外环、不同PMSG的GSC电流控制内环、不同PMSG的GSC直流电压控制外环、不同PMSG的PLL、不同PMSG的PLL及GSC直流电压控制外环。

2) 关于不同型号风电机组之间交互稳定性的研究相对较少,现有文献大多从模式谐振的角度进行了分析,只针对不同风机的某一特定环节展开研究,尚缺乏系统性的研究及一般性的结论。

4 展望

根据前文的梳理,大规模风电汇集系统小干扰稳定性的机理分析已取得了一定的进展,但该领域仍然存在较多研究空白,有待未来深入探索:

1) 不同场景下小干扰振荡产生机理的进一步研究。大规模风电汇集系统存在多种诱因导致的小干扰振荡失稳,学者们针对不同场景下的失稳机理进行了探索,但仍难以获得一般性的结论和系统性的成果,如PMSG风电系统是否会与串补输电发生交互引起振荡失稳仍存在争议。为了针对不同的振荡类型制定有效的控制策略、避免振荡失稳事故的发生,揭示出不同场景下风电汇集系统小干扰失稳发生的根本原因至关重要。

2) 分析方法的改进。目前用于分析大规模风电汇集系统小干扰振荡稳定性的方法主要有模式分析法和频域分析法。前者可以根据特征信息对参与主导小干扰振荡模式的动态元件及相应交互程度进行判定,但难以进行机理剖析;后者从负阻尼/负电阻的角度对小干扰失稳成因进行了物理解释,但难以辨识发生动态交互的具体元件。可以看到,目前广泛应用的小干扰稳定性分析方法均具有一定局限性,是否可以将模式分析和频域分析相结

合,提出一种兼顾物理机理解释与动态元件辨识的新方法,值得进一步思考。

3) 多环节参与的复杂动态交互稳定性研究。风电汇集系统不仅可能与外部电网发生动态交互,亦可能存在内部元件动态交互。随着高比例新能源电力系统的不断发展,风电汇集系统规模日益扩大、动态元件数目不断增多、外部电网结构愈加复杂,风电场场内/场网交互作用可能同时存在,如DFIG-串补振荡模式及PMSG直流电压控制振荡模式同时出现导致的多种振荡形态共存的失稳情况。如何准确辨识导致系统失稳的关键元件、确定主要影响因素,从而对大规模风电系统的众多控制参数进行协调优化,是一项十分有意义的研究课题。

4) 适用于大规模风电汇集系统小干扰稳定性分析的等值模型完善。现有针对风电汇集系统与外部电网动态交互稳定性的研究通常将成百上千台风机等值为聚合模型,忽略了风机之间的相互作用;针对风电汇集系统内部小干扰稳定性的研究亦建立在一定程度的等值模型基础上。随着风力发电技术的快速发展,大电网稳定性分析对于风电场模型的精细化要求不断提高,因此有必要进一步完善能够准确反映大规模风电系统动态特性的等值模型,以保证机理分析的准确性、普适性。

5 总结

实际电力系统中,风电汇集系统并网引发了多起振荡失稳事故,造成了严重的损失。考虑到风机渗透率在未来一段时间内将持续甚至急剧增加,迫切需要对大规模风电汇集系统小干扰振荡问题的本质机理进行深入探究。本文分析了研究风电汇集系统小干扰振荡稳定性的常用方法优缺点,分别对风电汇集系统与外部电力系统动态交互引发的小干扰振荡问题、风电汇集系统内部小干扰振荡问题进行了讨论,总结出以下结论:

1) 常用于分析大规模风电汇集系统小干扰稳定性问题的方法有全阶模式分析法、开环模式分析法、复转矩系数分析法及阻抗分析法,它们在稳定性判断准确度、模型建立复杂度、机理解析能力等方面各有优劣,需基于待研究问题的特点选择相适的方法。

2) 可能与风电汇集系统发生动态交互引起小干扰振荡问题的外部电力系统包括串补输电系统、直流输电系统、弱交流输电系统以及同步发电机组,四种问题的产生机理与分析手段存在一定区别。现有研究通常从模式分析或频域分析的角度将振荡失稳解释为动态交互引起的阻尼下降或系统

负电阻/负转矩现象,并探讨了影响系统稳定性的诸多因素,但对于某些交互场景下的小干扰失稳原因目前尚未形成统一性的结论和解析性的成果。

3) 大规模风电汇集系统内部小干扰振荡问题包括同型风机参数设置不合理导致的振荡失稳和不同型机群之间动态交互振荡失稳,前者可细分为各控制环节自身失稳以及不同环节之间动态交互失稳。现有文献基于模式分析和频域分析,探究了不同时间尺度下诱发风电汇集系统内部小干扰振荡失稳的主导元件及影响因素,但目前的研究大多针对某特定控制环节或特定时间尺度展开,缺乏一般性、系统性的成果。

最后,基于上述结论提出了改进的方向,希望能为大规模风电汇集系统小干扰振荡稳定性内在机理的研究和揭示带来一些启发。

参考文献

- [1] 施贵荣,孙荣富,丁华杰,等.大规模风电并网的评估指标体系构建与应用[J].电网技术,2021,45(3):841-848.
Shi Guirong, Sun Rongfu, Ding Huajie, et al. Construction and application on evaluation index system of large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 841-848(in Chinese).
- [2] Miranda V. Successful large-scale renewables integration in Portugal: Technology and intelligent tools[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(1): 7-16.
- [3] 王伟胜,张冲,何国庆,等.大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J].电网技术,2017,41(4):1050-1060.
Wang Weisheng, Zhang Chong, He Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060(in Chinese).
- [4] 国家统计局.2020年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2021-02-28). [http : //www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html).
National Bureau of Statistics of China. 2020 statistical bulletin on national economic and social development[EB/OL]. (2021-02-28). [http : //www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html) (in Chinese).
- [5] 姜齐荣,王玉芝.电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J].中国电机工程学报,2020,40(22):7185-7201.
Jiang Qirong, Wang Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201(in Chinese).
- [6] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等.电力系统新型振荡问题浅析[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2821-2828.
Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828(in Chinese).
- [7] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4720-4732.
Ma Ningning, Xie Xiaorong, He Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732(in Chinese).
- [8] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26(in Chinese).
- [9] Aik D L H, Andersson G. Impact of renewable energy sources on steady-state stability of weak AC/DC systems[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2017, 3(4): 419-430.
- [10] Adams J, Carter C, Huang S. ERCOT experience with subsynchronous control interaction and proposed remediation[C]//Proceedings of IEEE Power and Energy Society Transmission, 2012.
- [11] 董晓亮,谢小荣,李江,等.大型风电场中不同位置的风机对次同步谐振特性影响程度的比较分析[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5173-5180.
Dong Xiaoliang, Xie Xiaorong, Li Jiang, et al. Comparative study of the impact on subsynchronous resonance characteristics from the different location of wind generators in a large wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5173-5180(in Chinese).
- [12] Wang L, Xie X, Jiang Q, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [13] 谢小荣,王路平,贺静波,等.电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J].电网技术,2017,41(4):1043-1049.
Xie Xiaorong, Wang Luping, He Jingbo, et al. Analysis of subsynchronous resonance/oscillation types in power systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1043-1049(in Chinese).
- [14] Du W, Bi J, Wang H. Small-signal angular stability of power system as affected by grid-connected variable speed wind generators - A survey of recent representative works[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(3): 223-231.
- [15] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J].电网技术,2017,41(4):1035-1042.
Li Mingjie, Yu Zhao, Xu Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042(in Chinese).
- [16] 肖湘宁,罗超,廖坤玉.新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J].电工技术学报,2017,32(6):85-97.
Xiao Xiangning, Luo Chao, Liao Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy Sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97(in Chinese).
- [17] Chen C, Du W, Wang H, et al. Sub-synchronous oscillations in power systems caused by grid-connected wind farms — A survey of mechanism studies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(4): 495-503.
- [18] Fan L, Kavasseri R, Miao Z, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.
- [19] Fan L, Zhu C, Miao Z, et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1010-1020.
- [20] Fan L, Miao Z. Nyquist-stability-criterion-based SSR explanation for type-3 wind generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,

- 2012, 27(3): 807-809.
- [21] Miao Z. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 984-991.
- [22] Liu H, Xie X, Zhang C, et al. Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 474-483.
- [23] Xie X, Zhang X, Liu H, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1117-1126.
- [24] 赵书强, 李忍, 高本锋, 等. 双馈风电机组经串补并网的振荡模式分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3263-3273.
Zhao Shuqiang, Li Ren, Gao Benfeng, et al. Modal analysis of doubly-fed induction generator integrated to compensated grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3263-3273(in Chinese).
- [25] Song Y, Blaabjerg F. Overview of DFIG-based wind power system resonances under weak networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4370-4394.
- [26] Ma H, Brogan P, Jensen K, et al. Sub-synchronous control interaction studies between full-converter wind turbines and series-compensated ac transmission lines[C]. Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, 2012: 1-5.
- [27] Beza M B and Bongiorno M. On the risk for subsynchronous control interaction in type 4 based wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1410-1418.
- [28] Xu Y, Zhang M, Fan L, et al. Small-signal stability analysis of type-4 wind in series-compensated networks[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 529-538.
- [29] Liu H, Sun J. Voltage stability and control of offshore wind farms with AC collection and HVDC transmission[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1181-1189.
- [30] Amin M, Molinas M. Understanding the origin of oscillatory phenomena observed between wind farms and HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 378-392.
- [31] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网系统的多频段振荡特性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S1): 176-184.
Chen Baoping, Lin Tao, Chen Rusi, et al. Characteristics of multi-band oscillation for direct drive wind farm interfaced with VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 176-184(in Chinese).
- [32] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 采用 VSC-HVDC 并网的直驱风电场次/超同步振荡特性[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 44-59.
Chen Baoping, Lin Tao, Chen Rusi, et al. Analysis on characteristics of sub/super-synchronous oscillation caused by grid-connected direct-drive wind farms via VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 42(22): 44-59(in Chinese).
- [33] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 多直驱风机经 VSC-HVDC 并网系统场内/场网次同步振荡特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3835-3847.
Shao Bingbing, Zhao Shuqiang, Gao Benfeng, et al. Inside-wind-farm/wind-farm-grid sub-synchronous oscillation characteristics analysis in multiple D-PMSGs interfaced with VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3835-3847(in Chinese).
- [34] 王凡, 赵成勇, 郭春义. 直驱风电场与柔直互联系统的传递函数模型及其低频振荡稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1485-1498.
Wang Yifan, Zhao Chengyong, Guo Chunyi. Transfer function model and low-frequency stability analysis for PMSG-based wind farm interconnected with flexible-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1485-1498(in Chinese).
- [35] 郭贤珊, 李云丰, 谢欣涛, 等. 直驱风电场经柔直并网诱发的次同步振荡特性[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1149-1160+1407.
Guo Xianshan, Li Yunfeng, Xie Xintao, et al. Subsynchronous oscillation characteristics caused by pmsgbased wind plant farm integrated via flexible HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1149-1160(in Chinese).
- [36] 边晓燕, 丁炆, 买坤, 等. 海上风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡与抑制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 25-33.
Bian Xiaoyan, Ding Yang, Mai Kun, et al. Subsynchronous oscillation caused by grid-connection of offshore wind farm through VSC-HVDC and its mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 25-33(in Chinese).
- [37] 孙焜, 姚伟, 文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6520-6533.
Sun Kun, Yao Wei, Wen Jinyu. Mechanism and characteristics analysis of subsynchronous oscillation caused by DFIG-based wind farm integrated into grid through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6520-6533(in Chinese).
- [38] 宋斯珩, 赵书强. 基于转矩法的双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡分析[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 630-636.
Song Siheng, Zhao Shuqiang. Analysis of sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farm integrated to grid through VSC-HVDC system based on torque method[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 630-636(in Chinese).
- [39] Lü J, Dong P, Shi G, et al. Subsynchronous oscillation of large DFIG-based wind farms integration through MMC-based HVDC[C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 2401-2408.
- [40] 吕敬, 蔡旭, 张占奎, 等. 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3771-3781.
Lü Jing, Cai Xu, Zhang Zhankui, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3771-3781(in Chinese).
- [41] Lü J, Cai X, Amin M. Sub-synchronous oscillation mechanism and its suppression in MMC-based HVDC connected wind farms[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 1021-1029.
- [42] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of sub-synchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372(in Chinese).
- [43] Liu H, Xie X, He J, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [44] 万玉良, 朱玲, 项颂, 等. 直驱风电机组与弱电网交互作用稳定分析[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 118-125.
Wan Yuliang, Zhu Ling, Xiang Song, et al. Interactive stability analysis between direct-drive wind turbines and weak power

- system[J]. *Electric Power*, 2019, 52(9): 118-125(in Chinese).
- [45] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 6547-6562.
- Li Guanghui, Wang Weisheng, Liu Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid (Part I): analysis of wideband impedance characteristics and oscillation mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6547-6562(in Chinese).
- [46] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(二): 基于阻抗重塑的宽频带振荡抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(23): 6908-6920.
- Li Guanghui, Wang Weisheng, Liu Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid (Part II): suppression method of wideband oscillation based on impedance reshaping[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6908-6920(in Chinese).
- [47] 张学广, 马彦, 王天一, 等. 弱电网下双馈发电机输入导纳建模及稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1507-1516.
- Zhang Xueguang, Ma Yan, Wang Tianyi, et al. Input admittance modeling and stability analysis of DFIG under weak grid condition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1507-1516(in Chinese).
- [48] 李辉, 陈耀君, 李洋, 等. 双馈风电场并网对汽轮发电机次同步振荡的影响[J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(6): 47-54.
- LI Hui, CHEN Yaojun, LI Yang, et al. Impact of DFIG-based wind farms interconnected to power grid on subsynchronous oscillation of turbo generator[J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(6): 47-54(in Chinese).
- [49] Du W, Chen C, Wang H. Subsynchronous interactions induced by DFIGs in power systems without series compensated lines[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(3): 1275-1284.
- [50] 王一珩, 杜文娟, 陈晨, 等. 基于改进复转矩系数法的风电场并网引发电力系统次同步振荡研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(15): 3258-3269.
- Wang Yijun, Du Wenjuan, Chen Chen, et al. Research on sub-synchronous oscillation stability of multi-machine power system with the integration of multiple wind farms based on improved complex torque coefficient method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(15): 3258-3269.
- [51] 王一珩, 杜文娟, 王海风. 基于改进复转矩系数法的多风电场接入引发多机电力系统次同步振荡机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7): 2383-2395.
- Wang Yijun, Du Wenjuan, Wang Haifeng. Analysis of subsynchronous oscillation in multi-machine power system caused by the integration of multiple wind farms based on improved complex torque coefficient methods[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2383-2395.
- [52] Du W, Wang Y, Wang H, et al. Analytical examination on the amplifying effect of weak grid connection for the DFIGs to induce torsional sub-synchronous oscillations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(4): 1928-1938.
- [53] 吴杨, 肖湘宁, 罗超, 等. 直驱风机对火电机组次同步振荡的影响及抑制方法[J]. *现代电力*, 2019, 36(5): 31-38.
- Wu Yang, Xiao Xiangning, Luo Chao, et al. Impact of PMSG to thermal power units on sub-synchronous oscillation characteristics and suppression strategy[J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(5): 31-38(in Chinese).
- [54] Du W, Chen X, Wang H. PLL-induced modal resonance of grid-connected PMSGs with the power system electromechanical oscillation modes[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1581-1591.
- [55] Du W, Wang X, Wang H. Sub-synchronous oscillations caused by the PLL in the grid-connected PMSG for the wind power generation[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, 98: 331-341.
- [56] 陈骁, 杜文娟, 王海风. 开环模式谐振条件下直驱风机接入引发电力系统宽频振荡的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2625-2636.
- Chen Xiao, Du Wenjuan, Wang Haifeng. Analysis on wide-range-frequency oscillations of power systems integrated with PMSGs under the condition of open-loop modal resonance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2625-2635(in Chinese).
- [57] Wang D, Hu J, Huang Y, et al. Stability of DC-link voltage affected by phase-locked loop for DFIG-based wind turbine connected to a weak AC system[C]// *International Conference on Electrical Machines and Systems*, IEEE, 2014: 2600-2606.
- [58] Hu J, Huang Y, Wang D, et al. Modeling of grid-connected DFIG-based wind turbines for DC-link voltage stability analysis[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(4): 1325-1336.
- [59] Du W, Wang Y, Wang H, et al. Small-disturbance stability limit of a grid-connected wind farm with PMSGs in the timescale of DC voltage dynamics[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2366-2379.
- [60] Givaki K, Xu L. Stability analysis of large wind farms connected to weak AC networks incorporating PLL dynamics[C]// *International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)*, 2015: 1-6.
- [61] 徐衍会, 曹宇平. 直驱风机网侧换流器引发次/超同步振荡机理研究[J]. *电网技术*, 2018, 42(5): 1556-1564.
- Xu Yanhui, Cao Yuping. Research on mechanism of sub/sup-synchronous oscillation caused by GSC controller of direct-drive permanent magnetic synchronous generator[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(5): 1556-1564(in Chinese).
- [62] Hu J, Qi H, Wang B, et al. Small signal instability of PLL-synchronized Type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 31(4): 1676-1687.
- [63] Hu J, Wang B, Wang W, et al. Small signal dynamics of DFIG-based wind turbines during riding through symmetrical faults in weak AC grid[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 720-730.
- [64] Liu J, Yao W, Wen J, et al. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind Farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 545-557.
- [65] 刘巨, 姚伟, 文劲宇. 考虑 PLL 和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(11): 3162-3173+3371.
- Liu ju, Yao wei, Wen jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(11): 3162-3173+3371 (in Chinese).
- [66] 潘尔生, 王智冬, 王栋, 等. 基于锁相环同步控制的双馈风机弱电网接入稳定性分析[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 170-178.
- Pan Ersheng, Wang Zhidong, Wang Dong, et al. Stability analysis of phase-locked loop synchronized DFIGs in weak grids[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 170-178(in Chinese).
- [67] 朱廷猛, 孙海顺, 秦世耀, 等. 弱电网下双馈风机并网系统的次同步振荡研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(5): 1641-1648.

- Zhu Tingmeng, Sun Haishun, Qin Shiyao, et al. Sub-synchronous oscillation in DFIG system connected to weak grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1641-1648(in Chinese).
- [68] Du W, Dong W, Wang H. Small-signal stability limit of a grid-connected PMSG wind Farm dominated by the dynamics of PLLs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2093-2107.
- [69] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 一种直驱风电场中换流器控制系统间动态交互引起系统的失稳机理分析[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2423-2432.
- Wang Xubin, Du Wenjuan, Wang Haifeng. Mechanism analysis of instability caused by dynamic interactions between converter control systems in PMSG based wind farms[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2423-2432(in Chinese).
- [70] Du W, Wang Y, Wang H, et al. Reduced-order method for detecting the risk and tracing the sources of small-signal oscillatory instability in a power system with a large number of wind farms[J]. IEEE Transactions on Power System, 2021, 36(2): 1563-1582.
- [71] 陈晨, 杜文娟, 王灵安, 等. 双馈风电场内部多模式谐振引发电力系统次同步振荡的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 642-651+944.
- Chen Chen, Du Wenjuan, Wang Lingan, et al. Mechanism investigation of sub-synchronous oscillations in power systems as caused by multi-modal resonance within DFIG-based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 642-651+944(in Chinese).
- [72] Zhou H, Zhao L, Lee W. Robustness analysis of dynamic equivalent model of DFIG wind farm for stability study[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 5682-5690.
- [73] Du W, Dong W, Wang H. A method of reduced-order modal computation for planning grid connection of a large-scale wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1185-1198.
- [74] 周瑀涵, 王冠中, 王康, 等. 用于分析风电场小干扰稳定性的结构保持等值方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-12[2021-06-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210604.1336.004.html>.
- Zhou Yuhan, Wang Guanzhong, Wang Kang, et al. An equivalent method with maintained structure for analyzing small signal stability of wind farm[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-12[2021-06-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210604.1336.004.html>(in Chinese).
- [75] Du W, Chen X, Wang H. A method of open-loop modal analysis to examine the SSOs in a multi-machine power system with multiple variable-speed wind generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4297-4307.
- [76] Du W, Fu Q, Wang H. Concept of modal repulsion for examining the subsynchronous oscillations caused by wind farms in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 518-526.
- [77] Du W, Ren B, Wang H, et al. Comparison of methods to examine sub-synchronous oscillations caused by grid-connected wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4931-4943.
- [78] Canay I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine Part I: Theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982 (10): 3630-3638.
- [79] 王一珺, 杜文娟, 陈晨, 等. 基于复转矩系数法研究并网双馈风电场引发电力系统次同步振荡问题综述[J]. 发电技术, 2018, 39(3): 195-203.
- Wang Yijun, Du Wenjuan, Chen Chen, et al. A review of investigations on sub-synchronous oscillations in power systems caused by DFIG wind farms based on the complex torque coefficients method[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(3): 195-203. (in Chinese)
- [80] Shah S, Parsa L. Impedance modeling of three-phase voltage source converters in DQ, sequence, and phasor domains[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1139-1150.
- [81] Rygg A, Molinas M, Zhang C, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [82] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604.
- Wang Xubin, Du Wenjuan, Wang Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604(in Chinese).
- [83] Fan L, Miao Z. Wind in Weak Grids: 4 Hz or 30 Hz Oscillations?[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5803-5804.
- [84] Li Y, Fan L, Miao Z. Wind in weak grids: low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional Interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 109-118.
- [85] Du W, Wang Y, Wang Y, et al. Analytical examination of oscillatory stability of a grid-connected PMSG wind farm based on the block diagram model[J]. IEEE Transactions Power System, 2021, early access.
- [86] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
- Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154(in Chinese).



王一珺

收稿日期: 2021-6-24

作者简介:

王一珺(1994), 女, 博士研究生, 研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制, E-mail: wangyijun_ncepu@163.com;

杜文娟(1979), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, 本文通讯作者, E-mail: ddwenjuan@qq.com;。