

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210776

风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述

张天翼¹, 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 102206; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610064)

摘要: 随着高比例风电接入电力系统的实践日益增多, 并网风电系统在弱连接条件下可能会引发次同步振荡, 影响系统的安全稳定运行, 因此亟需揭示其内在产生机理。现有研究试图从多个角度、采用多种分析方法阐明弱连接条件下并网风电系统的小干扰稳定性机理。这些方法的运用促进了次同步振荡机理研究的深入, 同时也导致研究成果的碎片化, 需要进一步梳理。针对以上情况, 回顾并梳理了近年来国内外的研究成果, 从时域分析、模式分析、阻抗分析及复转矩系数分析4个方面, 综述了各自方法体系下的机理研究发展脉络以及弱连接条件下的应用现状。对不同分析方法在机理研究中的优势与局限进行了归纳和对比。最后, 基于归纳结果, 展望了各自方法在未来风电并入弱连接电网的小干扰稳定机理研究中的研究趋势和应用前景, 以期为大规模风电的长距离安全稳定输送提供有益的参考。

关键词: 弱连接; 机理分析方法; 并网风电系统; 次同步振荡

Research methods for subsynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review

ZHANG Tianyi¹, WANG Haifeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: As the practice of high proportion of wind power access to the power system gradually increases, sub-synchronous oscillation may occur in grid-connected wind power system under weak connection conditions, which affects the safe and stable operation of the system. Therefore, it is urgent to reveal the inherent mechanism. Current researches attempt to clarify the small disturbance stability mechanism of grid-connected wind power system under weak connection condition by using various analysis methods from multiple perspectives. The application of these methods promotes the in-depth study of the mechanism of sub-synchronous oscillation, but also leads to the fragmentation of research results, which needs to be further summarized. Given to the above situation, the research results both from China and foreign countries in recent years are reviewed and sorted out. From four aspects of time domain analysis, mode analysis, impedance analysis and complex torque coefficient analysis, the development of mechanism research under each analysis methodology and the application status of weak connection condition are summarized. The advantages and limitations of different analysis methods in mechanism research are summarized and compared. Finally, based on the results, the research trends and application prospects of each method in the future research on the stability mechanism of wind power integrated into the weakly connected power grid with small disturbances are prospected, in order to provide a beneficial reference for the safe and stable long-distance transmission of large-scale wind power.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900602).

Key words: weak connection; mechanism analysis; grid-connected wind power system; subsynchronous oscillation

0 引言

随着我国“30 60”碳减排目标的提出, 现代电力系统正逐步向高比例可再生能源和高比例电力电

子设备(“双高”)趋势发展。我国大规模陆上风电场主要集中在西部地区, 与东部负荷中心距离较远, 大规模风电经远距离输送并入交流电网会导致受端电网的连接强度降低, 增加系统失稳风险。

近年来, 国内外发生了多起由并网风电场引发的次同步振荡事故。2009年10月22日, 美国德克

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900602)

萨斯州电网出现次同步振荡事故并导致风机和系统部分原件损坏。事后的相关研究显示,事故的主要原因是串补度的提升与双馈风机(Double-fed induction generator, DFIG)控制系统间发生了次同步控制相互作用(Subsynchronous control interactions, SSCI)^[1-2]。国内风电场也曾多次出现类似事故。如张北沽源风电场投运后曾多次检测到次同步振荡现象,严重时导致了大范围的风机脱网^[3]。文献[4-5]对该现象的成因进行了分析。研究认为双馈风机的控制系统与线路串联补偿装置产生的感应发电机效应(Induction generator effect, IGE)是本次事故的主要原因,因此沽源次同步振荡事故与上文提到的德州次同步振荡事故具有相同成因。

自2015年6月起,我国新疆哈密地区电网发生了多起由并网直驱风电场(Permanent magnet synchronous generator, PMSGs)引发的次同步振荡事故。其中事故严重时导致距离风电场300 km外的多台火电机组切机,威胁到了电力系统的稳定运行。该事故呈现出新的特点:相关振荡区域没有串联补偿输电线路且该线路连接强度较弱,属于弱连接电网。文献[6]的研究表明,本次事故主要是由于PMSGs接入的当地交流电网是弱电网而导致的。

现有关于线路连接强度的判定多以短路比(Short circuit ratio, SCR)作为标准,一般定义短路比在2~3时为弱连接条件,短路比小于2时为极弱连接^[7]。其表达式如式(1)所示。

$$SCR = \frac{V_0^2}{X_L P_0} \quad (1)$$

式中: P_0 表示风电场的额定容量; V_0 为线路电压; X_L 为线路电抗。

由式(1)可以看出,连接强度的变化与线路电抗成反比关系,因此当风电场经远距离传输时,线路电抗增大,短路比变小,连接强度降低。该判定方法基于静态指标对连接强度进行了定义,具有简单、直接的优点。但同时,该指标也忽视了新能源场站对电网提供的无功功率分量、汇集的直流电网对并网的交流电网电压支撑能力不足等问题。为此,根据新能源场站的特性,学者们提出了多种衡量系统连接强度的指标。为了评价多回直流同时馈入交流电网的连接强度,国际大电网组织(CIGRE)提出了基于多馈入相互作用因子的多馈入短路比(Multi-infeed short circuit ratio, MISCR)^[8]。文献[9]基于解耦方法,提出了广义短路比指标,明确传统直流短路比在多馈入场景下的物理机理。该指标在无功率非常小时对于弱交流电网与极弱交流电网的定义与SCR

保持一致。文献[10-11]分别提出了加权短路比(Weighted short circuit ratio, WSCR)及复合短路比(Composite short circuit ratio, CSCR)的概念。文献[12]考虑工程实际,对多并网点交互影响下的短路比进行了研究,进一步提出了新能源多场站短路比(Multiple renewable energy station short circuit ratio, MRSCR)的概念,研究显示,当新能源场站MRSCR大于3.5时,系统稳定裕度较大。

除连接强度变化影响外,风力发电的自身特性也是导致系统振荡失稳的原因之一。风电并网通常采用矢量控制方案通过变流器来实现。这种并网控制可能对稳定性带来两方面的风险:一方面是风力发电具有的高穿透性会使交流电力系统的总体惯性显著降低,导致交流电力系统出现频率稳定问题^[13-17];另一方面,当风力发电与并网电力系统连接强度较弱时,并网风力发电系统可能会产生次同步振荡问题^[18-25]。例如,当电网连接强度减弱时,与锁相环(PLL)或变流器矢量控制系统相关的振荡模式的阻尼可能会变差,甚至出现不稳定现象^[25-27]。在特定条件下,并网风机与电网间的动态交互可能会引发电力系统小干扰稳定性问题,如:锁相环动态既可能与同步机轴系产生动态交互,又可能与风机换流器产生交互作用,若此交互作用较强时,可能会引起振荡失稳等一系列问题。

因此,当处于弱连接条件时,连接强度的变化可能会导致风机中控制器主导的次同步模式与同步机的轴系扭转模式间动态交互加强,产生负阻尼,进而对次同步振荡产生放大作用,威胁并网风力发电系统与交流系统的安全稳定运行。

针对以上现象,现有的分析方法从不同角度进行了分析和阐述,但由于各方法隶属于不同方法体系,针对不同问题往往存在不同的局限性:时域分析法虽然能够较好地模拟系统的动态变化趋势,但其存在运算速度慢、难以量化分析等局限,实际分析中难以对系统变化做出及时反应;模式分析法需要对系统模型进行整体建模,工作量大,对复杂系统来说整体建模的工作量十分巨大,给研究带来一定的困难;以阻抗法和复转矩系数法为代表的频域分析法在次同步振荡的分析中应用较为广泛,该方法简化后可以快速判断系统阻尼的变化趋势,及时发现条件变化带来的风险,但简化后无法判定特定条件下系统是否失稳,仅能做趋势分析。因此现有分析方法呈现碎片化特征,在解决实际问题时缺乏统一的解决办法,也缺少对不同场景适用性的归纳总结。

本文从时域分析、模式分析、阻抗分析和复转矩分析四个角度对近年来弱连接并网风电系统引发次同步振荡问题的实现步骤、适用场景以及存在的局限进行了归纳。进一步针对归纳的结果对不同方法进行了对比分析。在分析结果的基础上, 对目前主流方法需要进一步完善的内容进行了展望, 为后续研究提供一定的参考。

1 弱连接并网风电系统的稳定性分析方法

1.1 时域分析法

时域分析法的实现途径大致可分为两类: 以数学模型为基础的时域仿真^[26-27]和以物理元件等效为思路的实物、半实物仿真^[28-29]。基于构建的风电并网系统非线性数学模型, 通过对非线性方程的连续求解, 获得时域内风电并网系统变量的输出曲线, 并基于波动曲线是否收敛或其他判定指标^[30]来判断弱连接下系统的稳定性。该方法大多基于特有的软件仿真环境, 不受外部环境影响, 具备流程化的操作规程, 便于大多数科研学者进行分析结果的验证或工程事故的复现^[31]。但是, 其存在的问题主要体现在三个方面^[32-34]: 1) 时域仿真的结果在很大程度上依赖于数学模型的构建, 模型构建中的差异性会影响到分析结果的准确性; 2) 对于电力电子拓扑级的风电系统或大型风电并网系统, 时域仿真所需求解的数值维度激增, 进而导致计算效率低; 3) 该方法难以用于稳定性机理的分析, 只能用于对特定算例的稳定性判别, 分析结果的通用性差。因此, 常用作结论验证。

为提升时域仿真效率, 半实物、实物仿真等实时仿真技术得到了大力发展^[27-28]。相比于基于数值模型的仿真技术, 实时仿真技术改善了时域仿真方法的计算分析效率, 从一定程度上避免了纯数值模型带来的计算误差^[29], 但是其操作较为复杂, 投资成本高, 在普及性方面仍与前者有较大差距。此外, 不论是哪一类时域分析方法, 均无法从根本上解决其难以用于稳定性机理分析的缺陷。

1.2 模式分析法

模式分析法是研究弱连接下风电并网系统小干扰稳定性的主要方法之一^[35-38]。目前该方法的使用已经非常成熟, 主要包含确定系统的状态变量、列写系统的线性化方程、推导系统的状态空间模型以及求解系统的振荡模式等步骤^[35-36]。通过分析振荡模式是否位于复平面的左侧来判定弱连接下风电并网系统是否会失稳^[37]。如果存在任意模式位于复平面右侧, 则系统失稳, 并可以依据模式所对应的参与因子分析引发失稳的主要状态变量, 从而快速

判定引发弱连接下风电并网系统失稳的主要影响因素^[38]。上述分析结果也有助于附加阻尼控制器等稳定控制的设计。

但传统的模式分析法也存在一些缺点: 1) 与时域仿真法相同, 模式分析法也严重依赖于数值模型的构建, 但后者构建的是线性化模型, 因而要比时域仿真模型中构建的非线性模型简单, 计算效率更高; 2) 对于非线性系统, 例如电力电子拓扑级的风电系统, 模式分析法并不适用, 而对于大型风电并网系统, 模式分析法也会面临维数灾^[39], 进而导致计算效率低; 3) 传统的模式分析法可以用来判定特定场景下风电并网系统的小干扰稳定性, 也可以用来总结特定参数对风电并网系统小干扰稳定性的影响规律, 但是仍然难以揭示稳定性机理。

为解决传统模式分析法难以用于稳定性机理分析的缺陷, 文献^[16, 20]借鉴了频域分析法的研究思想, 在模式分析法的基础上进一步提出了开环模式谐振分析方法。该方法融合了模式分析法和频域分析法的分析思路, 在揭示弱连接风电并网系统的稳定性机理的同时还可以应用于多输入多输出系统的稳定性机理分析, 完善了现有模式分析法。

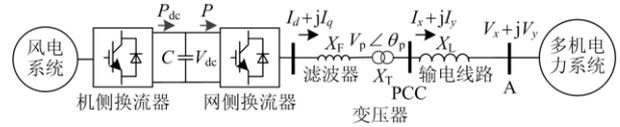


图 1 风电并网系统

Fig. 1 Grid-connected wind power system

以图 1 中的单风机经弱连接并网的系统为例, 开环模式谐振分析的主要步骤是: 首先建立风电子系统(记为子系统 A)和电力系统剩余子系统(记为子系统 B)。其中风电子系统中包含了风机的全部控制动态, 而剩余子系统中包含了线路和交流电力系统的全部动态过程。基于此, 可构建单风机经弱连接并网系统的反馈闭环互联模型如图 2 所示。

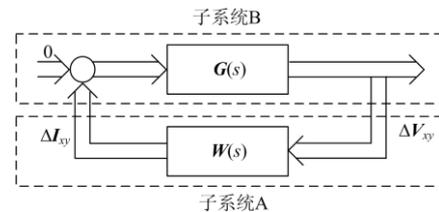


图 2 闭环互联模型

Fig. 2 Closed loop interconnection model

图 2 中, $\Delta I_{xy} = W(s)\Delta V_{xy}$ 表示子系统 A 的传递函数矩阵模型, $\Delta V_{xy} = G(s)\Delta I_{xy}$ 表示除并网风电

系统动态外，子系统 B 的传递函数矩阵模型。

开环模式分析法论证了当子系统 A 的开环振荡模式 λ_a 和子系统 B 的开环振荡模式 λ_b 在复平面上靠近时，闭环系统中两个振荡模式会发生排斥现象，进而导致两个模式中有一个模式会向复平面右侧移动，进而降低了弱连接下风电并网系统的稳定性。其排斥的幅度可以由 $\sqrt{R_A R_B}$ 来估计，其中 R_A 和 R_B 分别是 λ_a 和 λ_b 对应的留数矩阵。

文献[40-41]验证了上述方法在多输入多输出系统稳定性分析中的普适性，该方法可以用于分析复杂系统的稳定性机理，其指出的失稳机理是：当一个高维系统和另一个高维系统的开环振荡模式在复平面上相互靠近时，两个高维系统间会发生强动态交互作用，进而导致其中一个振荡模式向复平面右侧移动，降低了复杂系统的稳定性。弱连接在上述强交互动态过程中会改变交互的强度，连接程度越弱，风电系统和交流系统间的交互越强，系统越有可能失稳。

上述方法由于其对多变量系统振荡模式的指标计算更加直接，因此与模式分析法相比可以对开、闭环振荡模式偏移指标进行计算并将其较好地在大规模风电并网系统的稳定性分析中进行应用。

1.3 阻抗分析法

与时域分析法构建众多时域下的非线性方程不同，频域分析法主要是将众多非线性方程转化为 s 域，然后通过代入分析频段的频率，来判定弱连接下风电并网系统的稳定性[42-45]。频域分析法中具有代表性的是阻抗分析法[44-47]。

阻抗分析法基于风电场子系统和交流电网子系统的开环频域传递函数，分析闭环系统的稳定性，常用的分析手段有广义奈奎斯特判据、相角裕度判据、无源性判据、聚合 RLC 电路和阻抗网络模型等。子系统开环传递函数模型以电流和电压为输入和输出，因此称为阻抗模型。其模型如图 3 所示。

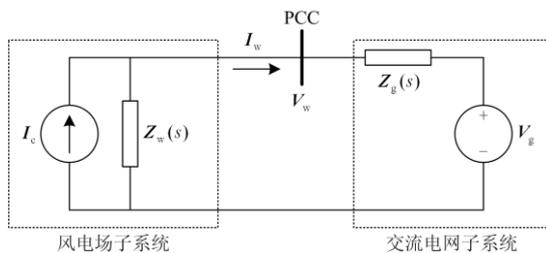


图 3 风电场并网系统阻抗电路模型

Fig. 3 Impedance circuit model of a wind farm integrated power system

根据坐标系选取的不同，阻抗模型可分为建立在静止坐标系下的序阻抗模型和建立在旋转坐标系下的 dq 阻抗模型，二者之间可以相互转换，且给出的稳定性判定结果是一致的。下面以序阻抗模型为例，介绍阻抗分析法的基本原理。

风电场子系统阻抗模型一般表示为诺顿等效电路的形式，由理想电流源 I_c 和阻抗 $Z_w(s)$ 并联构成，交流电网子系统阻抗模型一般采用戴维南等效电路的表示形式，由理想电压源 V_g 和阻抗 $Z_g(s)$ 串联构成[44]，二者构成互联系统的结构如图 3 所示，其中，风电场输出电流可表示为

$$I_w = \frac{Z_w(s)I_c}{Z_w(s) + Z_g(s)} - \frac{V_g}{Z_w(s) + Z_g(s)} = \left[I_c - \frac{V_g}{Z_w(s)} \right] \frac{E_2}{E_2 + Z_w^{-1}(s)Z_g(s)} \quad (2)$$

式中： $I_w = [I_{wp} \ I_{wn}]^T$ ； $V_g = [V_{gp} \ V_{gn}]^T$ ； $Z_w(s) =$

$$\begin{bmatrix} Z_{wpp}(s) & Z_{wpn}(s) \\ Z_{wnp}(s) & Z_{wnn}(s) \end{bmatrix}；Z_g(s) = \begin{bmatrix} Z_{gpp}(s) & Z_{gpn}(s) \\ Z_{gnp}(s) & Z_{gnn}(s) \end{bmatrix}；E_2$$

为 2×2 的单位矩阵；下标中的 p 和 n 分别表示正序分量和负序分量。

在风电并网系统稳定性分析中，一般假设两个子系统作为一开环独立系统时稳定。从而，由式(2)结合广义奈奎斯特判据可得，风电并网系统稳定的条件为：阻抗比矩阵 $Z_w^{-1}(s)Z_g(s)$ 特征值的奈奎斯特曲线净逆时针包围 $(-1, 0)$ 的圈数为 0[43]。若正序和负序之间不存在耦合，即式(2)中 $Z_{wpn}(s) = Z_{wnp}(s) = Z_{gpn}(s) = Z_{gnp}(s) = 0$ ，则可将两输入两输出系统的稳定性分析简化为两个单输入单输出系统的稳定性分析；这在三相对称系统中通常是成立的，对于 dq 坐标系下的阻抗模型，也有对角线元素相同，非对角线元素互为相反数，从而也可将 dq 坐标系下的两输入两输出系统转化为两个单输入单输出系统。通过测试与分析发现，系统中出现负阻抗会降低系统的稳定性，因此负阻抗也作为一个失稳机理被学者广泛证实与接受[42]。

基于广义奈奎斯特判据的稳定性分析法的优势在于子系统阻抗模型可基于测量获得[47]，从而可在系统模型或参数未知的条件下展开稳定性分析，具有一定的工程应用价值；但是这一分析方法仅能定性地给出系统稳定与否，无法直接反映失稳是由系统中的哪一元件或哪些元件引发的。针对以上局限，学者们试图从不同角度加以修正，进一步提

出了相角裕度判据^[48]、基于无源性原则的稳定判据^[49-50]等多种判据。但是相角裕度判据仅能处理单输入单输出系统的稳定性分析问题；无源性判据在稳定分析中则显得过于保守，仅能作为并网系统稳定的充分不必要条件。

1.4 复转矩系数法

除阻抗分析法外，复转矩系数法也是频域分析方法中较为常见的次同步振荡问题分析方法。复转矩系数法的主要研究思路为：将闭环系统拆分为互联的机械子系统和电气子系统，其中机械子系统包括发电机的轴系，剩余电力系统元件构成电气子系统，包括发电机的绕组、励磁控制器、输电线路等，两个子系统分别作为前馈和反馈，输入为转矩，输出为转子转速^[51]。

具体分析过程是：将两个子系统传递函数拆分为同步转矩系数 $K_m(\omega)$ 、 $K_e(\omega)$ 与阻尼转矩系数 $D_m(\omega)$ 、 $D_e(\omega)$ ，下标 m 表示机械子系统，e 表示电气子系统。以 $K_m(\omega) + K_e(\omega) = 0$ 确定 ω ，若此时

$D_m(\omega) + D_e(\omega) > 0$ ，则表示该扭振模式是稳定的，反之，系统振荡失稳^[52]。

复转矩系数法从阻尼转矩的角度解释了发电机轴系与风机间动态交互导致扭振失稳的问题，具有明确的物理意义，并且提供了简单快捷的稳定性评估方法，但是其稳定判据缺乏严格的数学证明。以 $K_m(\omega) + K_e(\omega) = 0$ 作为确定扭振频率 ω 的依据时，忽略了振荡模式实部和各模式间的耦合作用，进而导致无法准确识别扭振频率。同时，由于复转矩系数法的判据在推导之初就进行了大量简化，因此当分析多输入多输出场景时，其结论的正确性难以论证。

2 不同分析方法在弱连接并网风电系统稳定性分析中的应用

风机接入弱交流系统可能会导致系统阻尼降低进而产生次同步振荡、低频振荡等问题，需要从不同角度对弱电网的稳定运行进行研究。研究框架如图 4 所示。

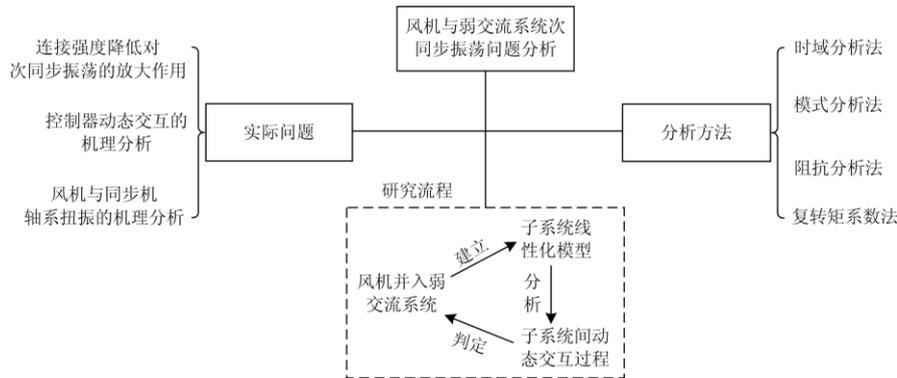


图 4 稳定分析框架

Fig. 4 Stability analysis framework

2.1 时域分析法

文献[30-31]基于时域仿真方法分析系统参数变化对并网风机锁相环动态特性及稳定性的影响。结果表明：系统阻抗越大，相关控制器阻尼越小，系统阻尼降低，可能存在失稳风险。以上研究提示了系统参数变化对锁相环阻尼的影响，但是其采用的模型较为简单，当系统模型变得复杂时，该方法的工作量将增大，很难满足实际系统的计算需求。文献[53]分析了次同步扭振产生的原因：在弱连接条件下，直驱风电场的一个次同步振荡模式会变为弱阻尼次同步振荡模式，但模式阻尼降低的原因并不清晰；同时也没有明确 PMSG 风场与同步机的动态交互机理。

时域分析法通用性不强、难以解释失稳机理，

还存在建模工作和计算工作较为复杂等问题。其中，关于机理分析方面的不足是分析方法本身所固有的，难以从根本上解决。因此该方法更适用于对实际问题的稳定性评估以及对其他机理分析方法的分析结果进行验证等方面的工作。

时域分析法的优劣及适用范围如表 1 所示。

2.2 模式分析法

采用模式分析法对风电场的稳定性进行分析，所得结果能够最直观地反映出并网风电系统的稳定情况及其影响因素。

文献[35-38]采用模式分析法分析了连接强度对风机与电网间耦合关系的影响。文献[35]研究了不同运行状态对弱电网下双馈风机并网系统的各振荡模态的影响，结果表明弱电网下风电机组发生小扰

表 1 时域分析法优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of

time domain analysis

方法	优势	局限	应用场景
数学方法	可以准确判断稳定状态	只适用于低阶模型验证； 依赖数学模型求解； 不具有通用性； 无法进行机理分析。	对理论分析结果进行检验
		普及性较低； 成本较高； 无法进行机理分析。	验证
实物仿真			

动失稳主要由锁相环振荡导致；文献[36-37]对VSC系统与锁相环动态的交互影响进行了研究，结果表明系统连接强度变弱时，VSC系统的最大稳定传输功率将大幅减小。文献[38]研究发现连接强度减小后风机的稳定运行域随之缩小，锁相环的动态对主导模式的影响最大。

以上研究对风电并网交互影响的环节进行了阐述，但缺乏对失稳机理的进一步揭示，这表明传统的模式分析方法难以真正揭示失稳机理。

文献[31]对直驱风机在弱连接条件下由锁相环主导的开环次同步振荡模式与同步发电机开环轴系扭振模式间的交互作用展开了研究，研究结果显示，当两个模式相近时会导致系统阻尼下降，进而引发次同步扭振的风险；文献[38]基于开环模式分析方法指出双馈风机与无串补电力系统其余部分子系统的开环次同步振荡模式之间相互接近会导致系统失稳；文献[53]对风电场换流器参数变化引发次同步振荡的原因进行了分析，结果表明控制器参数整定不当会导致直驱风电场的一个开环次同步振荡模式与同步发电机的开环轴系扭振模式在复平面上相互接近，此时发生的开环模式耦合降低了同步发电机闭环轴系扭振模式的模式阻尼。

开环模式分析法适用于对多输入多输出系统稳定性机理的分析与揭示，和阻抗法、复转矩系数法等方法形成互补，在机理分析方面具有较好的场景适用性。但其也存在一定问题：对于大规模风电场的分析仍依赖详细模型的建立，存在维数较高的问题，需要提供一种简单有效的降阶方法，降低分析过程中的运算规模。

模式分析法的优劣及适用范围如表 2 所示。

2.3 阻抗分析法

文献[42]采用阻抗分析法从电网强度影响以及锁相环控制参数影响方面对并网双馈风电场与弱交流系统间的影响进行了分析；文献[43]采用广义奈奎斯特判据并使用转子电流环控制、定子磁链降阶

表 2 模式分析法优缺点对比

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of

model analysis

方法	优势	局限	应用场景
经典模式分析	可以直观准确判断稳定性； 可以分析导致失稳的主要状态变量。	难以分析复杂系统； 无法进行机理分析。	对系统稳定状态进行直观准确评估。
开环模式分析	能够适应多输入多输出场景。	容易出现维数灾； 不具有物理意义； 无法定量评估稳定风险。	对多输入多输出问题进行定性分析与估算。

模型研究了双馈风机在弱交流电网中的稳定性影响；文献[44]考虑了频率支撑控制策略对系统稳定性的影响，并通过频域分析法提出了针对性的改进策略；文献[45]基于阻抗模型的研究表明：当并网直驱风电场换流器控制参数整定不当时，直驱风电场在次同步振荡频率下等效为负电阻，导致系统稳定性降低。

通过以上研究可以看出，广义奈奎斯特稳定判据可以较好地弱连接稳定情况进行评估。但是由于该方法是在假设正序和负序阻抗不存在耦合情况下得出的，因此所得稳定条件为近似值，对于弱电网稳定状态的评估偏向保守，也难以揭示子系统内的动态交互机理。最后，采用阻抗法分析复杂系统时，适当的量测点选取对于快速准确求解具有重要意义，目前对于量测点的选取仍依靠人工进行，缺乏判断依据。

阻抗分析法的优劣及适用范围如表 3 所示。

表 3 阻抗分析法优缺点对比

Table 3 Comparison of advantages and disadvantages

of impedance analysis

方法	优势	局限	应用场景
频域分析	可以快速得到分析结果； 可以进行机理分析； 具有物理意义； 工程应用性强。	无法应用于多输入多输出系统分析； 广义 Nyquist 判据评估保守； 无法分析暂态扭矩放大问题。	对单输入单输出问题进行定性分析与估算

2.4 复转矩系数法

学者们采用复转矩系数法对连接强度变化产生次同步振荡模式放大作用以及弱连接条件下控制器动态交互产生次同步控制相互作用的问题也进行了大量研究。文献[54]研究了锁相环与转子侧换流器电流环控制之间的动态交互作用，建立了锁相环-转子侧换流器电流环控制的阻尼转矩分析模型，据此分析了控制环节参数对系统稳定性的影响。文献

[55]采用复转矩系数法对不同工况下的动态交互作用进行了分析,提出当进行一般性分析时,扫描频率应为额定频率的2倍。文献[56]研究了PLL动态的关键影响因素,将风电机组其余控制环节和电力系统对PLL的影响等效为同步分量和阻尼分量的形式,分析了控制器参数和电网强度对PLL主导振荡模式的影响。文献[57]提出一种基于特征值灵敏度的改进复转矩系数法,该方法通过解耦建模的方式兼顾考虑了风电场并网引入的稳态潮流变化影响和动态交互作用影响,将复转矩系数法推广到多输入多输出应用场景,有一定的工程实用性。但该方法需要先分析同步机轴系振荡模式,然后再进行解耦计算,对于同步机和轴系的选取有较高要求,当系统较为复杂时,分析工作的计算量较大。同时,该方法目前只能处理同步机轴系的次同步扭振模式,需进一步进行一般性推论。

基于以上研究和分析,可以看出复转矩系数法具有求解便捷、物理意义明确等特点。同时,由于在推导之初进行了简化,因此容易出现振荡模式分析不清及判定结果不够准确的情况,需要将振荡模

式与控制环节解耦,避免近似计算对分析结果准确性造成影响。

复转矩系数法的优劣及适用范围如表4所示。

表4 复转矩系数法优缺点对比

Table 4 Comparison of advantages and disadvantages of complex torque coefficient analysis

方法	优势	局限	应用场景
复转矩系数法	判定快捷方便; 具有物理意义; 工程应用性强。	可能存在多模式耦合,导致漏判或误判; 扭振频率; 无法分析暂态扭矩放大问题。	对单输入单输出问题进行定性分析与稳定性估算。

3 弱电网下风电场次同步振荡机理研究方法的对比与展望

3.1 各研究方法对比总结

本小节基于章节2与章节3的分析结果,对不同研究方法的应用场景进行了分析并对后续研究进行了展望。本小节分析框架如图5所示。

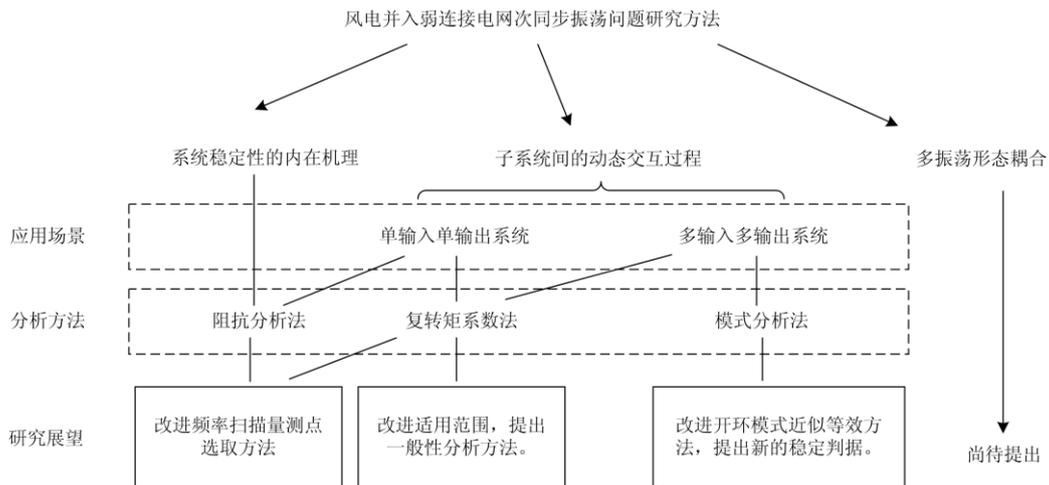


图5 研究方法对比与展望

Fig. 5 Comparison and prospect of research methods

目前风电并入弱连接电网的应用场景可以大致划分为单输入单输出系统与多输入多输出系统。其对应的研究思路可大致分为统一建模和分块化建模。

当处理单输入单输出(或可简化为单输入单输出的多输入多输出)场景时,阻抗法及复转矩系数法均可以在参数未知的情况下通过频率扫描与分块建模的方式快速开展稳定性分析,具有较强的工程意义。当应用于多输入多输出场景时,复转矩系数法需要结合模式分析法对轴系振荡模式进行解耦,然

后才可以对轴系稳定性进行判定;阻抗分析法的现有研究虽然从不同角度提出了各种稳定性判据,但在多输入多输出应用场景下的应用都需要进行降阶简化,简化后的稳定性判据结果较为保守。此外,两者都能够呈现子系统间的动态交互作用对系统稳定性的影响,但对于多个子系统之间的交互作用或者某个子系统内部不同动态元件间的交互作用,阻抗分析法和复转矩系数法都难以开展有效分析。

在多输入多输出场景下,目前较为有效的方式依然是采用模式分析法,其分析所得结果可以较好

地对弱连接电网的稳定性进行评估。但是,传统模式分析方法的结论难以揭示系统动态失稳的机理。因此在传统模式分析方法的基础上,采用分块化建模方式的开环模式分析方法可以较好地对于子系统间的动态交互过程进行分析,同时通过参与性分析,可以明确多个子系统间的交互作用或动态元件间的交互作用。但是,对于多输入多输出系统中多振荡模态耦合的问题,现有方法只能找出主导振荡模式并加以抑制,仍没有较好的分析方法能够对所有振荡模式进行解耦分析。因此,对于振荡形态耦合问题的研究还有待进一步深入。

3.2 研究方法展望

基于前文的分析结果,结合各分析方法的特性,本文尝试对后续研究进行展望,以期对研究方法的进一步完善提供有益借鉴。

共性问题研究展望:

1) 目前在风机并网的稳定性分析中大多采用线性化方法,随着系统中电力电子设备的不断增多,需要进一步对次同步振荡问题在非线性领域的研究加以深入,并提出抑制方法。

2) 如 3.1 节所述,在风机大规模并入的情况下,次同步振荡现象可能是由多振荡形态耦合造成的,需要提出一种新的方法或对现有方法进行改进,使之可以较好地分析多因耦合次同步振荡问题。

3) 对于大规模风电机组并入的复杂系统,基于稳定评估的多换流器协调优化控制策略将尤为重要,需要后续研究加以解决。

4) 缺乏针对性的风电场等值模型,阻碍了各方法工程化应用的进一步深入。现有风电场等值方法多采用将相似运行状况的风机群简单等效为一个单机或由多个等效风机构成风电场的方法(容量加权平均法),或者通过风电场并网点动态响应的实测或者仿真数据将风电场的动态特性等效为风机动态特性的方法(参数辨识法)来降低建模工作的难度。然而,采用容量加权平均法所得的聚合稳定判据较为保守;同时参数辨识法也无法分析风电机组数量、出力 and 参数等因素变化引发风电并网系统振荡失稳的机理。因此,亟需提出一种高效的风电场等值方法,在保持模型精度和分析能力的同时,尽量降低分析过程中出现的维数过高问题。

模式分析法研究展望:

开环模式分析方法基于近似计算结果,因此对于弱连接条件下的稳定性判据还有待进一步明确。

频域分析方法研究展望:

阻抗分析法与复转矩系数法都是基于频域扫描的结果对系统进行快速的稳定性判定,这对量测

点的选取提出了较高的要求。因此,如何在不同工况下选取适合的量测点对系统进行拆分,需要加以研究解决。

复转矩系数法研究展望:

改进的复转矩系数法可以应用于多输入多输出应用场景的稳定性分析工作中^[57]。该方法对风机控制单元与同步机轴系间的次同步扭振分析具有良好的效果,但在对风机控制单元间的动态交互分析方面还需要进一步研究,将研究场景加以推广。

4 结语

本文系统梳理了当前风电并入弱交流系统稳定性分析的主要方法——时域分析法、模式分析法、阻抗分析法以及复转矩系数法。对不同分析方法的求解思路、判定依据等进行了介绍,并在介绍过程中从优势、局限和应用场景三个方面对其特点进行了简要总结:时域分析法适用于分析验证工作;传统模式分析法对振荡机理揭示的能力有所欠缺;改进的开环模式分析法从控制理论角度出发对次同步振荡机理进行了诠释;阻抗分析法从负阻效应的角度揭示了系统振荡失稳的机理;复转矩系数法具有明确的物理意义,从阻尼转矩的角度为系统失稳提供了解释。进一步地,本文结合弱连接条件下风电并网的研究工作,分析了在风电并入弱电网的背景下各分析方法取得的研究成果和存在的研究空白。最后,基于以上研究缺失,结合应用场景适用性的对比结果,对分析方法存在的共性挑战以及部分分析方法存在的个性挑战进行了展望。

参考文献

- [1] 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.
- [2] SAHNI M, BADRZADEH B, MUTHUMUNI D, et al. Sub-synchronous interaction in wind power plants-part II: an ERCOT case study[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-9.
- [3] 董晓亮,田旭,张勇,等.沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析[J].高电压技术,2017,43(1):321-328.
DONG Xiaoliang, TIAN Xu, ZHANG Yong, et al. Practical SSR incidence and influencing factor analysis

- of DFIG-based series-compensated transmission system in Guyuan farms[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 321-328.
- [4] WANG L, XIE X R, JIANG Q R, 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.
- [5] LIU H K, XIE X R, ZHANG C Y, 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.
- [6] LIU H, XIE X, HE J, et al. Sub-synchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32 (6): 4708-4720.
- [7] GAVRILOVIC A. AC/DC system strength as indicated by short circuit ratios[C] // *International Conference on AC and DC Power Transmission*, September 17-20, 1991, London, UK: 27-32.
- [8] CIGRE. CIGRE working group B4.41. systems with multiple DC infeed[S]. Paris: CIGRE, 2008.
- [9] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 633-647.
XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 633-647.
- [10] ZHANG Y, HUANG S H F, SCHMALL J, et al. Evaluating system strength for large-scale wind plant integration[C] // *IEEE PES General Meeting*, July 27-31, 2014, National Harbor, USA: 1-5.
- [11] Report to NERC ERSTF for composite short circuit ratio (CSCR) estimation guideline[R]. Schenectady, NY, USA: GE Energy Consulting, 2015.
- [12] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 497-506.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 497-506.
- [13] LONG B, LIAO Y, CHONG K T, et al. MPC-controlled virtual synchronous generator to enhance frequency and voltage dynamic performance in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(2): 953-964.
- [14] JIANG K, SU H S, LIN H J, et al. A practical secondary frequency control strategy for virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2734-2736.
- [15] ZHANG X G, MENG L, XU D G. PCC voltage perturbation paths analysis and compensation for grid-connected voltage-source converter under weak grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020: 1-1. (Early Access).
- [16] DU W J, WANG Y, WANG H F, 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.
- [17] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(2): 163-170.
- [18] DU W J, WANG Y, WANG H F, et al. Collective impact of multiple doubly fed induction generators with similar dynamics on the oscillation stability of a grid-connected wind farm[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020: 1-1. (Early Access)
- [19] 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.
- [20] DU W J, WANG Y, WANG H F, 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*, 2020, 36(3): 2366-2379.
- [21] FAN L L, MIAO Z X. Wind in weak grids: 4 Hz or 30 Hz oscillations? [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5803-5804.
- [22] FAN L L, MIAO Z X. An Explanation of oscillations due to wind power plants weak grid interconnection[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 488-490.
- [23] LIU J, YAO W, WEN J Y, 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.
- [24] MALKHANDI A, SENROV N and MIAHRA S. Return ratio shaping approach to stabilize inverter weak grid system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 36(1): 253-263.
- [25] LIU B, LI Z, ZHANG X, et al. Impedance-based analysis of control interactions in weak-grid-tied PMSG wind turbines[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2021, 11(1): 90-98.
- [26] 孙昕炜, 史华勃, 倪江, 等. 弱联系电网中 SVC 引起

- 的次同步振荡分析及其抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 171-178.
- SUN Xinwei, SHI Huabo, NI Jiang, et al. Study of the sub-synchronous oscillation caused by SVC in weak-link power grids and its suppressing method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 171-178.
- [27] 李奕欣, 马燕峰, 赵书强, 等. 直驱风电场并网系统的密集次同步振荡模式分析[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 35-41.
- LI Yixin, MA Yanfeng, ZHAO Shuqiang, et al. Dense sub-synchronous oscillation modes analysis of direct-drive wind farm integrated into power system [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(11): 35-41.
- [28] 王欣浩. 永磁直驱风机并网系统次同步振荡问题分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- WANG Xinhao. Analysis and research on subsynchronous oscillation in grid-connected system of permanent magnet direct drive fan[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [29] 黄星宇, 罗萍萍, 龚锦霞, 等. 新能源并网系统次同步谐波相量检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 38-44.
- HUANG Xingyu, LUO Pingping, GONG Jinxia, et al. Subsynchronous harmonic phasor detection in a renewable energy grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 38-44.
- [30] 张德翔. 基于 RTDS 的伊敏机组次同步谐振分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- ZHANG Dexiang. Study on Yimin sub-synchronous resonance based on RTDS[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [31] LI Y, FAN L L, MIAO Z X. Wind in weak grids: low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35 (1): 109-118.
- [32] LI X C, YANG X. Research on control strategy of STATCOM for suppressing sub-synchronous oscillation based on nonlinear method[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1601.
- [33] LÜ J, CAI X, AMIN M, et al. Sub-synchronous oscillation mechanism and its suppression in MMC-based HVDC connected wind farms[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 12(4): 1021-1029.
- [34] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4777-4786.
- SUN Dawei, WU Linlin, LIU Hui, et al. Effect of the low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4777-4786.
- [35] GIVAKI K, XU L. Stability analysis of large wind farms connected to weak AC networks incorporating PLL dynamics[C] // Proceedings of 2015 International Conference on Renewable Power Generation, October 17-18, 2015, Beijing, China: 770-776.
- [36] 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.
- [37] JOVICIC D, LAMONT L A, XU L. VSC transmission model for analytical studies[C] // Proceedings of 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003, Toronto, Canada: 1737-1742.
- [38] DURRANT M, WERNER H, ABBOTT K. Model of a VSC-HVDC terminal attached to a weak AC system[C] // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, June 23-25, 2003, Istanbul, Turkey: 178-182.
- [39] DU W J, CHEN X, WANG H F. 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.
- [40] 古庭赟, 杨骐嘉, 林呈辉, 等. 基于单机等值与选择模态分析的风电场等值建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 102-111.
- GU Tingyun, YANG Qijia, LIN Chenghui, et al. A wind farm equivalent modeling method based on single-machine equivalent modeling and selection modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 102-111.
- [41] 张天翼, 杜文娟, 陈晨, 等. 弱连接条件下并网直驱风电场引发无串补电力系统次同步扭振机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5875-5885.
- ZHANG Tianyi, DU Wenjuan, CHEN Chen, et al. A mechanism investigation on SSTOs in power systems without series compensated lines induced by PMSG wind farms under the condition of weak grid connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5875-5885.
- [42] ZHOU Y, NGUYEN D D, KJAER P C, et al. Connecting wind power plant with weak grid-challenges and solutions[C] // Proceedings of 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada: 2705-2709.

- [43] DONG C H, ZHANG P, BAI Y, et al. The research of sub-synchronous oscillation in DFIG wind farm under weak AC grid[C] // 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies, February 17-20, 2019, Washington D.C., USA: 1404-1408.
- [44] 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.
- [45] 张明远, 肖仕武, 田恬, 等. 基于阻抗灵敏度的直驱风电场并网次同步振荡影响因素及参数调整分析[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2768-2777.
ZHANG Mingyuan, XIAO Shiwu, TIAN Tian, et al. Analysis of SSO influencing factors and parameter adjustment for grid-connected full-converter wind farm based on impedance sensitivity[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2768-2777.
- [46] 高家元, 赵晋斌, 陈晓博, 等. 弱电网条件下基于阻抗的稳定性判据重塑[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2762-2768.
GAO Jiayuan, ZHAO Jinbin, CHEN Xiaobo, et al. Reconstruction of impedance-based stability criteria in weak grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2762-2768.
- [47] YAN G G, HU W B, JIA Q, et al. Analysis of Sub-synchronous oscillation of direct drive PMSG based wind farm under low operating condition[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 16(2): 1-13.
- [48] SONG Y P, WANG X F, BLAABJERG F. Impedance-based high-frequency resonance analysis of DFIG system in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3536-3548.
- [49] 卓毅鑫, 李凌, 赵成斌, 等. 一种基于振荡发散速率的次同步振荡风电场精准切机策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 164-172.
ZHUO Yixin, LI Ling, ZHAO Chengbin, et al. A precision wind farm tripping strategy under sub-synchronous oscillation situation based on oscillation divergence rate[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 164-172.
- [50] WANG X F, BLAABJERG F, CHIANG L P. Passivity-based stability analysis and damping injection for multiparalleled VSCs with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8922-8935.
- [51] 王洋. 双馈风电并网电力系统小干扰振荡稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
WANG Yang. Small signal oscillation stability of the power system with grid-connected DFIGs[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [52] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 2-5.
XU Zheng. Applicability analysis and time domain simulation of complex torque coefficient method[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 2-5.
- [53] 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 the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [54] HU J B, WANG B, WANG W S, et al. Small signal dynamic behavior 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.
- [55] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part II: application to an arbitrary network[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10): 3639-3647.
- [56] HU J B, HUANG Y H, 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.
- [57] 王一珺, 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. Study on sub-synchronous oscillations of power systems caused by grid-connected wind farms based on the improved complex torque coefficients method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2383-2395.

收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-02-22

作者简介:

张天翼 (1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制; E-mail: hardmoon7@hotmail.com

王海风 (1961—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制在控制。E-mail: hfwang60@qq.com

(编辑 魏小丽)