

新型电力系统同步稳定研究综述及展望

张恒旭¹, 马睿聪¹, 曹永吉^{2*}, 刘奕敏³, 邹世豪³

(1.山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2.山东大学智能创新研究院, 山东 济南 250101; 3.国网山东省电力公司德州供电公司, 山东 德州 253011)



张恒旭, 1975年5月出生, 博士, 教授, 博士生导师, 山东大学教智化支撑研究院直属党支部书记、电动车电网接入技术国家地方联合工程实验室主任、教育部电气类教学指导委员会委员, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统监测和电力系统数值仿真。担任《IET Energy Systems Integration》《International Journal of Protection and Control of Modern Power System》《电力系统自动化》编委、中国电机工程学会理事。近年来主持国家重点项目3项, 国家自然科学基金面上项目1项。以第一或通信作者发表二区及以上SCI期刊论文40余篇, EI期刊论文80余篇。获国家科学技术进步奖一等奖1项、电力科学技术进步奖一等奖1项。获国际和国家发明专利40余项。

摘要:新型电力系统的稳定特性发生显著变化。为深化对同步稳定问题的理解, 对相关领域的研究进行综述与展望。阐释传统交流电力系统与新型电力系统间同步稳定机制的差异, 重点分析跟网型换流器和构网型换流器的同步特性。探讨静态同步稳定与暂态同步稳定问题的研究理论体系, 总结当前关于新型电力系统同步稳定性提升的相关策略。归纳有关同步稳定问题研究取得的经验性成果, 明确亟待解决的研究方向, 为未来开展更深入的研究提供参考。

关键词:新型电力系统; 跟网型换流器; 构网型换流器; 静态同步稳定; 暂态同步稳定

中图分类号:TM71 **文献标志码:**A

引用格式:张恒旭, 马睿聪, 曹永吉, 等. 新型电力系统同步稳定研究综述及展望[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(2): 1-15.

ZHANG Hengxu, MA Ruicong, CAO Yongji, et al. Review and prospect of research on new power system synchronous stability[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2): 1-15.

Review and prospect of research on new power system synchronous stability

ZHANG Hengxu¹, MA Ruicong¹, CAO Yongji^{2*}, LIU Yimin³, ZOU Shihao³

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Academy of Intelligent Innovation, Shandong University, Jinan 250101, Shandong, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Company Dezhou Power Supply Company, Dezhou 253011, Shandong, China)

Abstract: The stability characteristics of the new power system changed greatly. To enhance the understanding of synchronous stability problems, the review and prospect of research in relevant fields were presented. The differences in synchronous stability mechanisms between the traditional alternating current power system and the new power system were clarified, where the synchronous behavior of the grid-following converter and the grid-forming converter was analyzed. The theoretical framework for static and transient synchronous stability was discussed, and the current strategies to improve synchronous stability in the new power system were summarized. The empirical achievements in synchronous stability research were reviewed, and the critical research directions that require urgent attention were identified, serving as a reference for future in-depth studies.

Keywords: new power system; grid-following converter; grid-forming converter; static synchronous stability; transient synchronous stability

收稿日期:2024-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U22B6008); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE133)

第一作者简介:张恒旭(1975—), 男, 山东德州人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统监测和电力系统数值仿真。E-mail: zhanghx@sdu.edu.cn

***通信作者简介:**曹永吉(1992—), 男, 山东青州人, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、可再生能源并网及储能技术应用。E-mail: yongji@sdu.edu.cn

0 引言

随着全球环境问题治理压力日益增大,亟须加快推动新型电力系统的转型速度^[1]。风、光等新能源大规模接入,导致电力系统的同步方式由发电机主导的物理同步向换流器主导的控制同步转变,同步机理发生显著变化^[2-3]。

受新能源出力具备的时变性、不确定性等特征和电力电子设备具备的非线性、异构性等特征的影响,新型电力系统的动态特性发生显著变化,传统电力系统的稳定分析理论无法直接套用,亟须发展新型电力系统稳定分析理论体系^[4-5]。

新型电力系统的动态特性转变与并网换流器(grid-connected inverter, GCI)技术发展息息相关^[6-7]。与同步发电机动态特性相比,并网换流器的动态特性完全由内部的控制策略决定。并网换流器依据同步控制策略可分为跟网型(grid-following, GFL)换流器和构网型(grid-forming, GFM)换流器^[8]。GFL换流器采用锁相环(phase-locked loop, PLL)测量公共连接点(point of common coupling, PCC)处电压,获取并网同步信息;GFM换流器通过计算并网点处功率,利用功率控制环调节并网频率。

并网换流器采用的控制策略具备耦合性和非线性特征,控制参数设计矩阵维度高,在实际运行过程中出现静态同步失稳现象^[9-10]。相较于传统电力系统小扰动问题,静态同步稳定问题具备明显的宽频振荡特征^[11]。静态同步稳定问题的难点在于新能源机组惯性低,系统发生微小扰动会引起功角剧烈振荡,应用并网换流器使系统非线性提升,换流器装置功率输出与控制策略密切相关,功角曲线分析受限于非线性控制环节模型求解,难以获得解析形式,无法获取静态同步稳定所需的振荡信息^[12-14]。

随着并网换流器技术的推广,风、光等新能源接入规模扩大,新型电力系统惯量降低,并网换流器过载运行能力差,在较大短路电流情形下发生闭锁现象,新型电力系统更容易发生大规模脱网事故^[5]。现阶段研究重点关注在发生故障后新型电力系统如何维持稳定运行,属于暂态同步稳定问题范畴。相较于传统电力系统,新型电力系统中并网换流器控制环节为非线性控制,在发生故障时,并网换流器无法承受过大暂态电流,控制方式存在在线切换策略,动态特性更加复杂,使暂态同步稳定

问题更加复杂化^[15-16]。

基于以上研究背景,本研究综合已有研究,阐释传统交流系统同步机制与新型电力系统同步机制,分析新能源机组并入电网对传统交流系统的影响效应;总结现有有关静态同步稳定问题研究理论体系,归纳静态同步稳定分析方法;介绍暂态同步稳定问题及提升暂态同步稳定性的策略研究;总结归纳有关同步稳定问题研究取得的经验性成果、亟待解决的研究方向,为进一步开展研究提供参考。

1 传统电力系统主导电源的同步方式

传统交流系统的同步实质上是一种机械同步,由原动机占据主导地位,调速器及励磁系统充当保险装置,保证电力系统安全稳定运行。传统交流系统等效图如图1所示。将各节点等效为质块,由弹簧振子连接,发电机等效质块(简称同步质块)能够输出动力,同步质块间也通过弹簧连接,整个系统在完成同步时相对静止,当系统发生扰动时,等效于向系统某方向注入功率,系统开始发生振荡,各机组的力学方程可表示为

$$\mathbf{F}_{T,i} + \mathbf{F}_{L,i} + \sum \mathbf{F}_{e,ij} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

式中, i, j 为节点编号, \mathbf{F}_T 为原动机输出动力, \mathbf{F}_L 为等效负荷阻力, \mathbf{F}_e 为等效传输线路传动力。

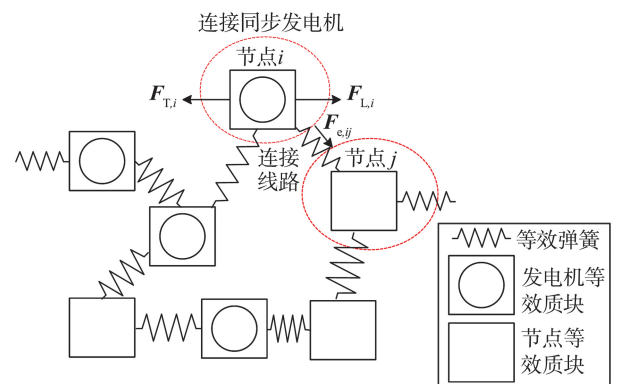


图1 电力系统等效图

Fig.1 Power system equivalent diagram

力学方程本质上等效于电力系统中的功率方程,在实际运行中,等效负荷阻力大小、方向确定后,原动机输出动力与等效传输线路传动力也随之确定。由图1可以看出,当等效夹角改变时,等效传输线路传动力发生改变,两机组间传递功率

$$P_e = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \theta_{12}, \quad (2)$$

式中, E_1, E_2 分别为两机组端电动势, X 为两机组间连接阻抗, θ_{12} 为两机组间功角差。

假设相连两同步质块间弹簧的劲度系数 k 由 E_1, E_2, X 确定,即 $k=f(E_1, E_2, X)$, 弹簧弹性形变模长 $|x|$ 由 θ_{12} 确定,即 $|x|=g(\theta_{12})$, 阻尼系数 D 由发电机组特性确定,可得等效传输线路传动力

$$F_c=f(E_1, E_2, X)g(\theta_{12})。 \quad (3)$$

当系统发生扰动时,向系统中注入能量,假设能量是短时期内以恒定功率注入,系统的运动方程可表示为

$$m\mathbf{a}=\Delta\mathbf{F}-D_M\mathbf{a}, \quad (4)$$

式中, \mathbf{a} 为系统加速度, $\Delta\mathbf{F}$ 为注入能量等效动力的变化量, D_M 为系统等效阻尼系数, m 为系统等效质量。

各质块运动方程可表示为

$$m_i\mathbf{a}_i=\Delta\mathbf{F}_L+\sum\Delta\mathbf{F}_{e,ij}, \quad (5)$$

式中, $\Delta\mathbf{F}_L$ 为等效负荷阻力的变化量, $\Delta\mathbf{F}_{e,ij}$ 为等效传输线路传动力的变化量。

由于系统内各质块的惯性系数不同,在清除扰动后,系统沿扰动方向在阻尼作用下衰减释放扰动能量,系统内各质块间位置发生相对振荡,最终恢复相对静止状态,达到同步过程。在实际解析计算过程中, $\Delta\mathbf{F}_L$ 和 $\Delta\mathbf{F}_{e,ij}$ 为非线性函数,难以获取系统的解析解形式,常采用数值计算方法求解。

新能源机组接入对电力系统的影响等效为与同步机组间的连接方式变为绳结连接,如图2所示。

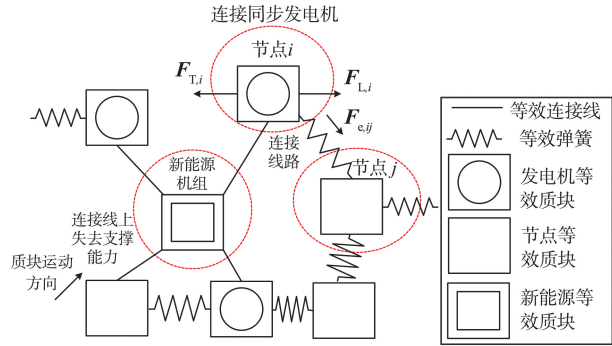


图2 新能源机组接入电网等效图

Fig.2 The power system equivalent diagram with new energy units connected

新能源机组对系统产生作用响应速度更快,省略动能—弹性势能—动能转换过程,提高能量释放速度,但系统惯性相对降低,新能源机组无法向同步机组提供频率支撑能力。当环绕新能源质块振荡过程中向新能源质块发生偏移时,连接线压缩,环绕新能源质块无法获取支撑能力,同时新能源质块在该连接方向上失去约束能力,发生剧烈振荡,增加系统失稳风险,不利于系统稳定运行,系统稳定分析复杂度提高。

综上所述,需对新能源机组同步原理开展研究,量化系统安全稳定运行区域,评估系统运行风

险,保障新型电力系统的安全稳定运行。

2 新型电力系统的同步机制

众多学者在 dq 坐标系下分析并网换流器同步策略问题,已取得大量成果。GFL 换流器并网后表现为受控电流源特性,控制策略的实现为通过 park 变换将电网测量量转换至 dq 坐标下,控制电流的分量对有功和无功进行解耦控制。GFM 换流器等效电路为受控电压源,其有功控制与功角相关,无功控制与电压相关,电气特性与同步机类似。

2.1 GFL 换流器的同步机制

GFL 换流器在电网中的等效电路如图3所示。 i_t 和 θ_t 分别为电流控制量和功角控制量, R_c 和 L_c 分别为并联电阻器的电阻、并联电感器的电感, R_s 和 L_s 分别为串联电阻器的电阻、串联电感器的电感, u_s 为等效电源电压。在正常运行时,电力系统需要同步发电机或同步调相机提供并网点电压,其稳定性能受电网强度影响大,弱电网条件下 GFL 换流器运行面临巨大挑战^[16]。由于 GFM 换流器的输出电压由输出功率确定,在极弱电网下, GFM 换流器具备稳定运行能力。相较于 GFL 换流器, GFM 换流器的同步信息由控制策略提供,使用场景更灵活,但稳定性问题分析更复杂,难以确定控制环节中的参数,给电网设计带来难题^[17]。现阶段在柔性直流输电、风电机组并网、光伏阵列中多使用 GFL 换流器。

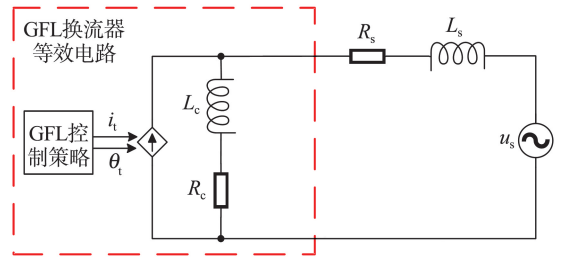


图3 GFL换流器等效电路图

Fig.3 GFL converter equivalent circuit diagram

经典电流矢量控制 GFL 换流器如图4所示,其中下标 ref 表示对应物理量为参考值,下标 0 表示对应物理量为额定值, V_{DC} 为直流电压, $k_{c,p}$ 和 $k_{c,e}$ 分别为电流控制器比例增益系数和积分增益系数, L_f 为等效电感。

由图4可知,并网处三相电压

$$u_{t,abc}=u_{s,abc}+i_{s,abc}R_s+L_s\frac{di_{s,abc}}{dt}, \quad (6)$$

式中,下标 abc 表示在 abc 坐标系下, i_s 为并网换流器向电网输出的三相电流, t 为时间。

转换至 dq 坐标系下的并网点处电压为

$$\begin{cases} u_{t,d} = u_{s,d} + R_s i_{s,d} + L_s \frac{di_{s,d}}{dt} - \omega_0 L_s i_{s,q} \\ u_{t,q} = u_{s,q} + R_s i_{s,q} + L_s \frac{di_{s,q}}{dt} + \omega_0 L_s i_{s,d} \end{cases}, \quad (7)$$

式中,下标 d, q 表示 dq 坐标系下的方向, ω_0 为额定等效转速。

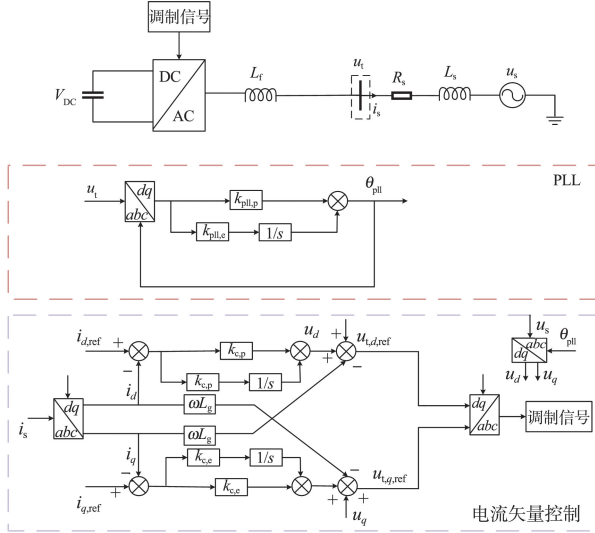


图4 电流矢量控制 GFL 换流器示意图

Fig.4 Current vector control GFL unit diagram

PLL 控制方程为

$$\theta_{pll} = \int \left[k_{pll,p} u_{t,q} + \left(\int k_{pll,e} u_{t,q} dt \right) \right] dt, \quad (8)$$

$$\omega_{pll} = k_{pll,p} u_{t,q} + \int k_{pll,e} u_{t,q} dt, \quad (9)$$

式中, θ_{pll} 为 PLL 输出相角, ω_{pll} 为 PLL 输出角频率, $k_{pll,p}$ 为 PLL 控制环节比例增益系数, $k_{pll,e}$ 为 PLL 控制环节积分增益系数。

电流矢量控制环节实现有功无功解耦控制, d 轴电流控制有功功率输出, q 轴电流控制无功功率输出。电流参考信号由采取的功率控制策略决定, 根据功率控制策略输出的参考控制信号, 与电网量测获得的电压信息获取电流参考信号^[15]。

当 PLL 中输出的 $u_{t,q} = 0$ 时, 实现相位锁定, 此时输出的 θ_{pll} 为并网处的电压相位^[7]。PLL 输出的相位信息决定 GFL 控制信号的优劣, PLL 虽具备快速锁定同步信息的性能, 但在弱电网条件下易发生同步稳定问题。现阶段已有研究表明, 高带宽 PLL 和电网高阻抗降低系统的小扰动稳定性^[18]。文献^[19]指出 GFL 换流器失稳的主要原因是使用 PLL 使 GFL 换流器输出阻抗为复阻抗特性, 降低系统的阻尼比。系统的短路比影响并网换流器输出的静态稳定裕量, 总体趋势呈正相关性, 当系统静态稳定裕量不充足时, 系统容易出现小扰动失稳问

题^[20]。通过改变并网换流器等效导纳能够改善系统的小扰动稳定性^[21]。在低短路比-低阻抗比工况下, PLL 带宽过高引入负导纳, 诱发同步稳定问题, 需合理配置 PLL 参数; 在低短路比-高阻抗比工况下, 系统控制环节引入的负导纳和 PLL 引入的负导纳共同作用, 影响系统阻尼, 诱发同步稳定问题^[19]。

2.2 GFM 换流器的同步机制

GFM 换流器并网主要通过控制策略实现, 相较于 GFL 换流器, 控制分析更加复杂, 应用场景更加灵活, 等效电路如图 5 所示。

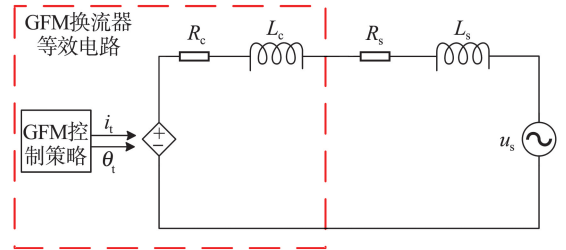


图5 GFM 换流器等效电路图

Fig.5 GFM converter equivalent circuit diagram

依据直流侧是否具备恒定电压源, GFM 装置的外环控制策略可分为两种控制模式: 直流电压控制^[16]和有功功率控制^[8]。当直流侧具备恒定电压源时, 同步信息由有功功率决定; 当直流侧不具备恒定电压源时, 同步信息由直流电压决定^[16]。GFM 换流器的控制框架如图 6 所示, 其中 θ_e 、 V_e 、 P_e 和 Q_e 分别为换流器的功角、电压幅值、有功功率和无功功率。

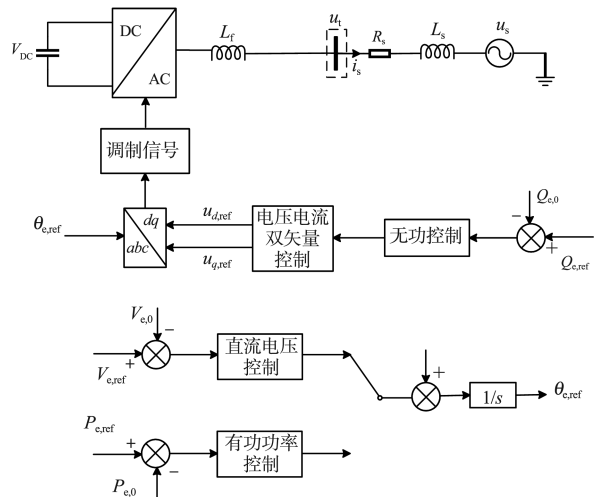


图6 GFM 控制示意图

Fig.6 GFM control diagram

有关有功功率控制策略研究已十分深入, 包括下垂控制^[22-23]、功率同步控制^[24-25]和虚拟同步机^[26]等。控制策略如图 7 所示, 其中 ω_i 为等效转速, D 为等效阻尼, J 为等效惯量。

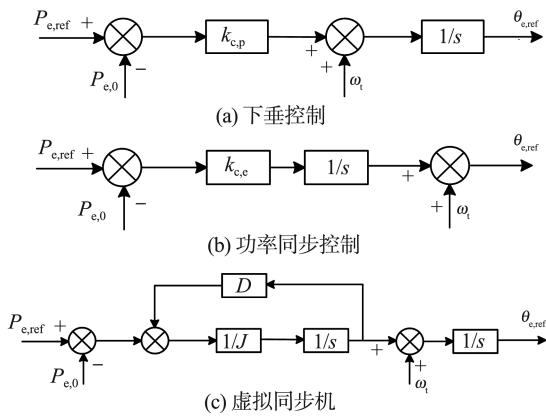


图 7 有功功率控制策略

Fig.7 Active power control strategy

GFL 换流器和 GFM 换流器有关提升同步稳定性的研究可分为两方面:控制参数设计和控制环节设计。控制参数设计与同步稳定问题分析结论相关联。现有研究表明,电网的短路比^[27]、阻抗比^[28]、滤波器参数^[29]、输入信号量测误差^[30]等影响控制参数设计。设计方法为通过分析并网换流器的同步稳定问题,得到控制系统的特征方程,分析系统响应的时域指标,改善系统各环节控制参数,提升系统同步稳定性^[31-32]。由于实际工程中部分参数难以获取,控制参数设计实现较为困难。控制环节设计为在原有控制系统中增加新的控制环节,提高系统性能。研究问题针对性强,需确定分析场景。

针对 GFL 换流器,文献[11]分析直驱风机增加附加频率控制,使新能源机组获取惯性支撑能力,有效提升电网静态稳定能力;为减少发生高压直流换相失败现象,文献[33]增加滑动平均滤波器(moving average filter, MAF)和前馈补偿环节;为消除不平衡条件下 GFL 输出的三次谐波电流,文献[34]改进瞬时有功无功控制(instantaneous active reactive control, IARC)参考电流生成方法。PLL 中存在的频率限制器减弱故障信号相位变化,延长故障信号振荡时间,结合比例积分微分(proportional-integral-differential, PID)控制方法,能提升系统同步稳定性能^[35]。大型电力系统具备极其复杂的运行工况,使控制环节设计问题分析难以具备规范化的设计体系,需针对特定工况进行设计改进。

针对 GFM 换流器,文献[36]基于下垂控制,增加频率跟踪控制环节,提出分散式优化控制策略,增强岛状微电网运行稳定性;文献[37]在直流电压控制环节增加电流前馈控制,降低支流侧电容电压波动,提高并网换流器的频率支撑能力;文献[23]提出增加下垂控制系数能够提升并网换流器的电网频率支撑能力,但会降低系统的小扰动稳定性,

引入辅助阻尼分量能够有效解决小扰动稳定性恶化问题;文献[24]分析并网换流器的一阶暂态功角特性,增加虚拟功率同步环,以保证故障后系统存在稳定工作点;文献[25]相较于文献[24]原理相同,分析场景更加具体;文献[38]基于虚拟同步机控制策略,利用直流侧电容动态特性获取同步信息,提升系统在弱电网下的运行能力。

3 新型电力系统的静态同步稳定问题

3.1 静态同步稳定的分析模型

GFL、GFM 换流器和传统机组功角曲线如图 8 所示。图 8 中 GFL 换流器极限有功功率对应的功角 δ 为 $\pi/2$ ^[20], P 为有功功率。GFM 换流器存在限流限制,同步发电机(synchronous generator, SG)的功角曲线沿用经典功角曲线模型,当输出功率为 P_c 时,系统运行存在稳定运行点(stable equilibrium point, SEP)和不稳定运行点(unstable equilibrium point, UEP)。因此,图 8 中 $P_{max,S}$ 、 $P_{max,M}$ 和 $P_{max,L}$ 分别为 SG、GFM 和 GFL 的最大有功功率, $\delta_{s,S}$ 、 $\delta_{s,M}$ 和 $\delta_{s,L}$ 分别为 SG、GFM 和 GFL 的 SEP 功角, $\delta_{u,S}$ 、 $\delta_{u,M}$ 和 $\delta_{u,L}$ 分别为 SG、GFM 和 GFL 的 UEP 功角。由图 8 可以看出,GFL 换流器和 GFM 换流器功角运行曲线范围为 $[0, \pi/2]$, 相较于 SG, GFL 换流器和 GFM 换流器的稳定运行区域减小,更容易出现静态失稳问题。

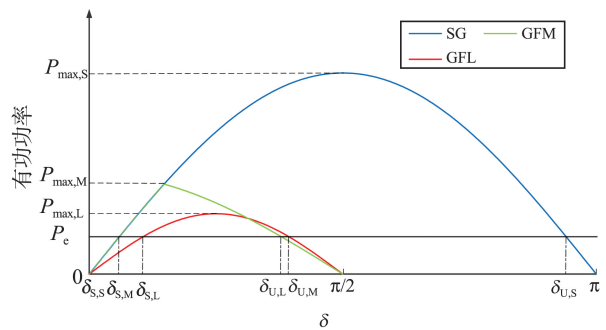


图 8 GFL、GFM 换流器和传统机组功角曲线
Fig.8 GFL converter, GFM converter and conventional unit power angle curves

相较于传统电力系统小扰动问题,静态同步稳定问题具备明显的宽频振荡特征,根据振荡频率高低,可将宽频振荡主要划分为高频振荡、次超同步振荡和低频振荡。相关学者研究表明,GFL 换流器中常见的 PLL 可以在低电网短路比电网中引起电网基频附近的边带振荡^[39]。GFM 换流器接入串联补偿电网,导致电网中的边带振荡,通过合理配置控制参数,提升

直流输电系统的低频振荡稳定性^[40]。

现阶段,静态同步稳定性研究重点在于变流器并网时静态同步稳定机理和提升系统静态稳定运行裕度的方法策略。解决静态同步稳定问题是开展裕度提升方法策略研究的基础。已有针对新能源并网系统的静态同步稳定问题研究方法,从分析角度看,主要分为时域分析方法和频域分析方法两大类。时域分析方法主要为基于状态空间模型的特征分析方法,频域分析方法包括复转矩系数法^[40-41]、阻抗分析方法^[42]。通常针对特定场景进行方法改进,以适用于实际分析。

依据数学变换将静态同步稳定性问题的分析方法分为两大类:第一类是根据设备的物理特性,构造等效单输入单输出(single-input single-output, SISO)系统,得到对应的稳定判据;第二类是直接由多输入多输出(multi-input multi-output, MIMO)系统导出稳定判据或量化稳定裕度指标^[43-44]。在进行分析时,新能源机组在实际运行中往往为多台机组并联运行,需考虑机组并联运行功率分配问题,运用单机系统的静态同步稳定理论分析并联系统时,得到的结果通常为保守估计结果^[45]。文献[45]改进虚拟功率控制,通过引入低通滤波器减弱输出有功无功间的耦合关系,解决并联逆变器系统间功率分配问题。文献[46]确定统一的 dq 坐标系,改进传统的同步坐标系锁相环(synchronous reference frame-phase lock loop, SRF-PLL)小信号模型,克服其不适用于多台机组并联研究的缺陷。

新能源并网系统数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{x} 为系统运行过程中的状态量,包括系统的频率、相角等; $\dot{\mathbf{x}}$ 为系统状态量的微分; \mathbf{y} 为系统运行过程中的输出量,在新能源并网分析时为并网换流器输出电流; \mathbf{u} 为控制量。化简得到时域小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \end{cases}, \quad (11)$$

式中, $\Delta \mathbf{x}$ 、 $\Delta \mathbf{u}$ 和 $\Delta \mathbf{y}$ 为状态量、控制量和输出量的变化量, $\Delta \dot{\mathbf{x}}$ 为状态量微分的变化量, \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 为换流器的参数矩阵。

基于构建时域小信号模型进行分析,列写系统的全状态方程,考虑所有状态量,分析矩阵方程的特征根,依据奈奎斯特准则判别系统的静态同步稳定性,即对式(11)化简得

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{A}} \Delta \mathbf{x}, \quad (12)$$

式中 $\bar{\mathbf{A}}$ 为化简后的状态矩阵。计算 $\bar{\mathbf{A}}$ 的特征根,分

析系统静态同步稳定性。

将构建的时域小信号模型转换至频域,采用阻抗分析方法进行静态同步稳定性判别。依据时域状态方程,进行拉普拉斯变换后可得

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{G}(s) \Delta \mathbf{u}, \quad (13)$$

式中 $\mathbf{G}(s)$ 为电力系统的传递函数。

根据上述分析方法,可以构建频域状态矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta U_d \\ \Delta U_q \end{bmatrix} = \mathbf{Z}(s) \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: ΔU_d 和 ΔU_q 分别为 d 轴和 q 轴电压变化量; ΔI_d 和 ΔI_q 分别为 d 轴和 q 轴电流变化量; $\mathbf{Z}(s)$ 为频域下新能源机组的输出阻抗矩阵,与并网换流器控制策略有密切联系。

在交互系统稳定性分析中,阻抗分析方法对系统的参数需求少,计算分析方便,在考虑控制环节间耦合特性时,采用SISO已无法反映并网换流器运行机理,需构建MIMO模型^[42]。文献[47]在 dq 坐标系下构建 d 通道和 q 通道阻抗模型,采用阻抗比量化 d 、 q 通道间耦合关系,揭示谐波振荡机理,给出一种较为保守的小扰动稳定分析方法;文献[48]分析并网换流器的激励-响应关系,提出幅值/频率调制方法,将并网换流器结构分为4个基本环节,每个环节激励-响应模型与环节的结构相关;为提高阻抗分析法计算速度,文献[49]针对电网拓扑分析开展研究,更快获取系统导纳矩阵,保证计算精度。

3.2 静态同步稳定的研究方法

有关静态同步稳定研究体系已趋于成熟,但随着大量电力电子设备投入,电网的运行特性仍在改变,静态同步稳定研究需继续开展。静态同步稳定研究的分析流程如图9所示。

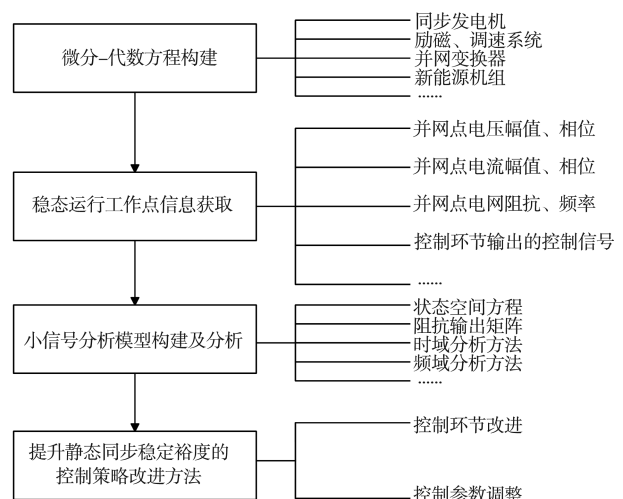


图9 静态同步稳定分析流程

Fig.9 Static synchronization stability analysis flow

静态同步稳定研究的具体分析流程如下。

(1) 确定电力系统的运行场景及系统中各组件的微分-代数方程,涉及电力系统各组成部分适用于静态同步稳定分析的模型构建。文献[12]从离散角度分析,构建单个脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)周期内的并网换流器数学模型;文献[13]构建详细三相通用 GFM 换流器模型;文献[14]构建换流器的类 Heffron-Phillips 动力学模型,反映弱电网下 GCI 的静态同步稳定特征;文献[50]对基于双馈感应电机的船用推进系统(doubly fed induction motor-based shipboard propulsion system, DFIM-SPS)进行小扰动分析,构建 DFIM-SPS 的微分-代数方程,对模型稳定平衡运行点出进行线性化,构建 DFIM-SPS 小信号模型,在分析方法上与现有分析方法原理相同,未有改进之处;文献[51]分析双馈风机的静态同步稳定性,构建双馈风机微分-代数方程,微分-代数方程越详细,模型精确度越高,计算结果越精确,计算复杂度越高。

(2) 确定电力系统中可获取的稳态运行参数,如稳定运行点处电压和电流的幅值与相位、控制器参数、电网阻抗等。其中,获取准确的电网阻抗参数较为困难。电网阻抗影响系统静态稳定分析,有两种方法解决该问题。一是运用阻抗辨识方法,提高获取电网阻抗准确度。例如,文献[13]提出一种静态同步稳定的评估方法,考虑线路阻抗的不确定性,采用几何方法将稳定问题可视化,确定系统的稳定边界;文献[52]运用二次残差二进制序列理论,提出一种用于实时电网阻抗测量与小信号模型结合的小扰动分析方法。二是计及阻抗的不确定性,确定系统的安全稳定运行边界。

(3) 构建系统的状态空间方程,采用静态同步稳定方法分析系统稳定性。现阶段研究主要分为两类。一是传统方法解决新场景问题。文献[53]分析 GCI 和主动前端(active front-end, AFE)换流器,建立 GCI 和 AFE 换流器的精细化模型,采用阻抗分析方法对各个环节进行小信号建模,获得频域下等效输出阻抗矩阵;文献[10]分析含线性变参数(linear parameter-varying, LPV)换流器的静态同步稳定性,构建小扰动模型,以获得阻抗矩阵;文献[54]针对风电机组与同步机组并联系统的静态同步稳定问题,利用阻抗方法进行分析;文献[55]基于状态空间模型,采用特征分析方法研究高比例新能源接入下的系统静态稳定。二是新方法解决传统场景问题。考虑传统李雅普诺夫分析方法的结

果通常具备保守性,文献[10]采用傅里叶变换将线性时变状态空间方程转换为频域方程,在频域下进行分析,给出频域特征根的计算方法,验证理论的正确性;文献[56]针对高阶 Kuramoto 模型,采用中心流理论,量化静态同步稳定性指标;文献[57]提出一种大规模电力系统的同步稳定边界判断方法,与传统的状态空间模型特征分析法相比,不需要进行矩阵特征值计算,通过灵敏度变化实现小扰动振荡模式辨识;文献[58]依据获得的广义阻抗矩阵构建系统的原-对偶复电路,实现输入-输出的解耦分析;文献[59]构建多输入多输出模型,采用块对角占优理论实现模型降维。静态同步稳定分析结果精确与否,将决定改进后的控制策略稳定性优劣。上述文献中提到的静态同步稳定方法分析结果仍较为保守,对稳定运行边界量化精确度还有提升空间,因此需开展静态同步稳定方法研究,提升方法研究的准确度。

(4) 改进系统的同步控制策略,提升系统运行裕度,主要包括静态稳定裕度、静态电压裕度、功率裕度等性能。同步控制策略改进方法可分为两类。一是增加新的控制环节。文献[13]在不确定的阻抗情形下获取系统稳定运行边界,引入虚拟阻抗控制提升系统的稳态稳定运行性能,确保系统运行在稳定区域内;文献[51]采用多变量控制系统的 Nyquist 阵列理论,引入伪对角化转换控制,将系统转化为对角化矩阵,判别系统静态稳定性;文献[60]针对 PLL 控制引入线性反馈补偿器,使 GFL 换流器的静态稳定能力不依赖于初始的 PLL 参数设计,通过改变线性反馈补偿器,提升 GFL 换流器在弱电网下的静态运行能力;文献[61]提出并网换流器的统一控制换流器,实现 GFL 换流器和 GFM 换流器的综合控制,提升系统小扰动稳定性;文献[62]构建扩张观测器,在风机振荡过程中补充虚拟惯量,使输出功率更快逼近实际值。二是控制环节中参数设计。文献[9]对影响换流器静态同步稳定的关键参数因素进行分析,基于提出的静态同步稳定评估方法,整定控制环节参数;文献[10]构建线性参数变化控制的功率同步跟网型换流器(linear parameter-varying control of power-synchronized grid-following inverter, LPV-PSGFLI)静态同步分析模型,计算参数对静态稳定性能影响率;文献[11]分析含附加频率控制环节的 GFL 换流器,确定最大振荡控制耦合系数,通过改变该系数提升 PLL 静态同步稳定性能。

3.3 静态同步稳定的影响因素

国内外已有研究表明,影响系统静态稳定的因素主要有以下 3 点。

(1) 系统的静态同步稳定性受当前稳定电压的影响。稳态运行电网电压较低时,并网换流器输出电流上限较低,影响并网换流器输出功率及静态储备系数,不利于系统静态安全稳定运行^[20]。在发生电压跌落问题时,并网换流器输出功率急剧下降,同步不稳定现象发生^[63]。

(2) 系统的静态同步稳定性受电网阻抗的影响,结论如图 10 所示。并网换流器接入系统后,电网阻抗过高时,系统整体等效阻尼较小,有时呈现正阻尼,发生低频振荡现象^[19]。在研究中以电网短路比 R_{sc} 表征并网换流器接入电网的相对强度^[16], R_{sc} 较小时,电力系统更容易发生静态同步稳定失稳现象。文献[64]提出系统广义 R_{sc} ,进一步精确描述电网强度,当系统的 R_{sc} 较小时,系统静态同步稳定性差,当 GFM 换流器接入电网后 R_{sc} 在 1 附近时,系统不一定存在稳定工作点^[16]。

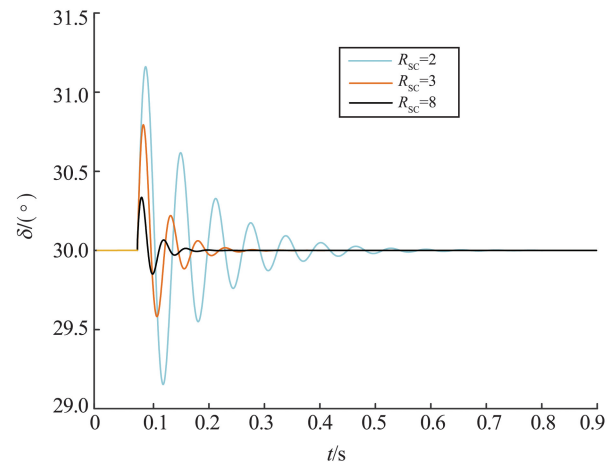


图 10 不同短路比下并网点与等效机组功角振荡曲线
Fig.10 Oscillation curves of equivalent unit power angle under different short circuit ratios

(3) 并网换流器控制参数及控制方式影响系统的静态同步稳定性。运用复转矩系数法分析系统的控制环节,可得阻尼传递函数 $D(s)$,通过改变现有控制环节参数或增加新的控制环节,能够有效增加系统的静态稳定裕度,提高系统稳定运行能力。

4 新型电力系统的暂态同步稳定问题

4.1 暂态同步稳定的研究方法

并网换流器暂态问题是电力系统安全稳定运行亟待解决的问题,相较于静态同步稳定研究,对该问题的研究较少。文献[15-16]针对 GFL 和

GFM 换流器讨论暂态同步稳定机理,总结归纳一般性规律;文献[27,55,65]已给出特殊场景下暂态同步稳定问题的机理。暂态同步稳定问题需针对具体场景构建模型,目前还未形成普适性的暂态同步稳定分析理论体系。传统的暂态稳定问题分析已初步具备体系,文献[66]详细分析了已有的传统暂态稳定问题分析方法,可借鉴已有的传统暂态稳定问题研究成果探究暂态同步稳定问题。

暂态同步稳定分析方法可分为时域仿真法^[67]、直接法^[68]及人工智能方法^[69],如图 11 所示。

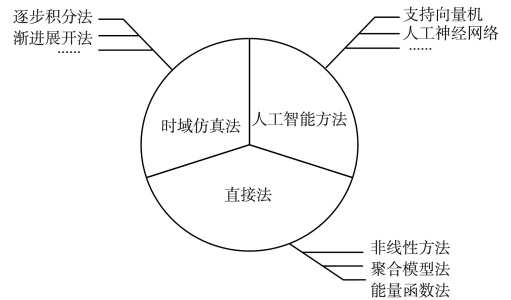


图 11 暂态同步稳定问题研究方法分类

Fig.11 Classification of research methods for transient synchronization stability

现阶段希望获取电力系统暂态同步稳定问题的解析解,对直接法开展了许多研究,主要分为两个方面。一是对经典的暂态分析方法进行改进,以适用于并网换流器暂态问题分析,如能量函数法^[68,70]、聚合模型法^[71]等。部分学者对能量函数法和聚合模型法进一步拓展,以提高暂态同步稳定判别的准确度。为实现暂态同步稳定的严格判定,文献[72]构造解析的李雅普诺夫函数,确定系统的稳定工作区域;文献[73-74]构建并网换流器短路故障期间的简化等效功角模型,采用等面积准则分析系统暂态稳定性,分析结果具有保守性。二是基于现阶段非线性数学理论发展,构建系统简化等效模型,拓展适用于并网换流器暂态分析的全新理论体系。文献[65]给出下垂控制的控制函数,在 dq 坐标系下构建简化的 GFM 换流器数学模型;文献[75]采用幅相运动方程构建适用于暂态稳定分析的并网换流器数学模型;文献[76]给出考虑并网换流器输出限流情形下的扰动功率曲线,通过相图定量分析暂态稳定性。暂态同步稳定问题分析方法的优缺点如表 1 所示。

进一步依据分析方法获取暂态同步稳定机理,对并网换流器控制策略进行调整,提高系统的暂态同步稳定性。文献[15]对部分已有能够提升暂态同步 GFL 换流器和 GFM 换流器的控制策略进行总结归纳,GFL 换流器主要为调整外环指令和改变滤

波结构或参数,GFM换流器在GFL换流器基础上增加输出限流约束;文献[62]针对提出的控制策略构建风机轴系暂态能量函数,确定参数设置范围;文献[65]改进下垂控制策略,相较于已有的虚拟阻抗限流控制和切换控制策略控制方法,所提方法不需要进行故障检测和在线控制切换,能有效应对电

压降低时系统不稳定运行状况;文献[73]针对电流边界条件开展研究,提出最大有功、负无功及考虑暂态稳定性能的电流控制方式,提升系统稳定性,减少过电压现象发生;文献[74]依据分析结果,改变PLL架构,增加虚拟变阻器控制环节,提高系统暂态性能。

表1 暂态同步稳定问题分析方法

Table 1 Analysis methods for transient synchronization stability

方法	优点	缺点	适用场合
时域仿真法	计算结果精确,可信度高	方法复杂度高,难以快速求解	离线稳定性分析
直 接 法	能量函数法	能够量化系统安全稳定运行区域,直观反映系统运行机理,计算速度快	能量函数难以准确构造,分析结果偏保守,分析结果仅反映稳定运行场景,无法反映暂态过程变化模式
	聚合模型法	计算速度较快,能够快速提取系统运行频率特征,直观反映系统频率变化模式	方法准确性依赖于聚合模型构建精确度,高比例新能源接入使构建聚合模型复杂度提升
	非线性方法	相较于时域仿真法,计算速度较快,同时保证准确度	受限于非线性数学理论研究,构建系统简化等效模型复杂度高,缺乏体系理论指导
人工智能方法	应用场合广泛,可与其他分析方法结合,不需要考虑物理原理,直接获取所需分析结果,具备良好的发展前景	对数据集要求较高,现有数据维护难以满足要求,需要更新迭代数据特征提取算法,受限于现阶段技术手段	理论上适用于任何场景

在实际运行中,电网发生大扰动,并网连接点的电压、电流快速变化,换流器的控制环节受扰动影响,导致系统的等效控制阻尼改变,输出的控制信号不断振荡。相较于传统暂态问题,同步稳定中的暂态稳定分析难点在于:并网换流器中控制环节为非线性控制,难以直接构建线性数学模型揭示系统运行机理,同时,并网换流器控制环节与电网具备耦合性,控制环节中的控制信号受电网运行状态影响,进一步提升分析难度;并网换流器在电网中引入大量谐波,包括开关频率附近的高次谐波、控制参数耦合产生的低次谐波等^[77],产生的谐波难以采用滤波换流器完全滤除,在进行暂态分析时,忽略谐波影响使分析结果具备保守性,难以准确量化安全稳定运行区域。

4.2 暂态同步稳定的影响因素

针对现有并网换流器暂态同步稳定性研究,GFM和GFL换流器暂态同步稳定性影响因素大致相同,可总结为以下4点。

(1) 暂态同步稳定性受换流器并网点电压和电流信息的影响。对于GFM换流器,注入有功功率超过稳定运行区域时,静态平衡点丢失,系统无法恢复至稳定运行状态^[71];对于GFL换流器,注入有功功率使并网点处的电压跌落,电压跌落程度越深,越容易丢失静态稳定点^[8]。在并网换流器运行

过程中增加无功输出能够提升换流器的同步稳定性^[78]。

(2) 影响GFL换流器暂态同步稳定性的关键因素之一是电压相角,GFM换流器受电压相角影响相对较小。这是因为电流型换流器采用PLL换流器跟踪并网点相角信息,在相角信息发生突变时,PLL换流器输出的角频率信息振荡,难以稳定跟踪并网点相角信息^[79];GFM换流器的角频率信息通常是由功率控制环节产生,振荡程度小于电流型换流器^[80]。

(3) 并网换流器的控制环节参数影响暂态同步稳定性。GFL换流器采用PLL换流器获取同步信息,高带宽的PLL换流器虽提高了PLL换流器的响应速度,但不利于暂态同步稳定性提升^[81];GFM换流器通过功率控制环节获取同步信息,同步环节在暂态过程中输出高次谐波,影响GFM换流器的电流输出,使并网点处电流信号发生畸变,扩大故障的影响,通过增加阻尼系数有利于提高同步稳定性^[16]。

(4) 并网换流器控制环节的配合方式影响暂态同步稳定性。并网换流器分为外环控制和内环控制,外环控制为功率控制策略,内环控制为电流矢量控制,现有研究表明,直流电压控制、定功率控制等方式对系统影响相当于在系统中引入负阻尼^[9],

不利于系统的暂态稳定运行,因此需改进控制策略,提高系统的同步稳定性能。

5 高比例新能源接入下同步稳定研究展望

高比例新能源接入电网已成为发展趋势,电网电力电子规模化逐步扩大。相较于同步发电机,并网换流器在物理结构上存在的限制小,响应速度快,进行功率调节更加灵活,可控性更强。但并网换流器多为非线性元件,运行规律难以量化描述,通常采用试验验证或依据已有的精确化仿真模型进行稳定性分析,极大增加了电网同步稳定问题计算的负担,有关含高比例新能源电力系统的稳定性问题分析更加复杂。

现阶段有关静态同步稳定问题的研究已逐步具备理论体系,已有方法能够保守分析系统的静态同步稳定性,针对不同工况,调整并网换流器的控制参数及控制策略,保证系统稳定运行,不发生静态同步失稳现象。随着新能源占比升高,孤岛微电网技术发展,GFL换流器与GFM换流器在孤岛微电网中占据主导地位,系统惯性降低,面临更严重的失稳问题^[82]。现有静态同步稳定问题研究以单机等效机组分析为主,理论拓展至多机大电网的可行性仍需论证,同时电力系统宽频特征显著,进一步增大了问题的分析难度。因此需开展静态同步稳定问题研究,分析并网换流器对电网稳定性影响机理,量化稳定运行区域,保证含高比例新能源的电力系统安全稳定运行。

暂态同步稳定问题研究是目前亟待解决的关键科学问题之一。有关暂态同步稳定问题的研究相对较少。暂态同步稳定问题实质上为求解高阶非线性方程组问题。相较于同步发电机,并网换流器控制更加灵活,控制策略种类繁多,充分利用其灵活多变的可控性,实现并网换流器间协调配合运行,能够有效提升系统的暂态同步稳定性,因此需发展并网换流器技术。但并网换流器大规模接入电网,增大了暂态同步稳定方程组的阶数与非线性程度,使问题更加复杂。上述研究中提出的方法多以单机无穷大系统为例开展暂态同步稳定机理研究,分析结论准确性取决于等效单机模型的构建,分析偏保守性,未能诠释暂态同步稳定机理。当研究系统进一步拓展至多机系统时,系统的复杂度迅速增加,已有的线性化方法适用性降低,需进一步深入分析暂态机理,探讨适用于大规模电网系统的

暂态同步稳定分析方法。

6 结论

本研究在已有研究基础上,对新型电力系统同步稳定问题的国内外研究进展进行综述与展望,总结现阶段静态同步稳定问题和暂态同步稳定问题的研究现状。现阶段电力系统随并网换流器规模扩大,非线性特征越发显著,同步稳定问题分析复杂度提升。因此,需借鉴已有传统电力系统的同步稳定研究成果与试点运行工程经验,实现电力系统新能源占比的迅速增长,保证电力系统安全稳定运行,构建绿色清洁电网。

参考文献:

- [1] 张恒旭,高志民,曹永吉,等.高比例可再生能源接入下电力系统惯量研究综述及展望[J].山东大学学报(工学版),2022,52(5):1-13.
ZHANG Hengxu, GAO Zhimin, CAO Yongji, et al. Review and prospect of research on power system inertia with high penetration of renewable energy source [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5): 1-13.
- [2] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [3] 曹永吉,张恒旭,张怡,等.基于事件驱动的机组快速频率响应控制方法[J].电力系统自动化,2021,45(19):148-154.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, ZHANG Yi, et al. Event-driven fast frequency response control method for generator unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 148-154.
- [4] ADEMOLA-IDOWU A, ZHANG B. Frequency stability using MPC-based inverter power control in low-inertia power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1628-1637.
- [5] 曹永吉,张恒旭,施啸寒,等.规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J].电力系统自动化,2021,45(18):1-8.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, et al. Preliminary study on participation mechanism of large-scale distributed energy resource in security and stability control of large power grid [J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2021, 45(18): 1-8.
- [6] 马睿聪, 邹世豪, 曹永吉, 等. 基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统参数分类辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 26-37.
MA Ruicong, ZOU Shihao, CAO Yongji, et al. Sensitivity analysis-based classification and identification method of a synchronous condenser and its excitation system parameter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 26-37.
- [7] HE X, GENG H. PLL synchronization stability of grid-connected multiconverter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 830-842.
- [8] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1702.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1702.
- [9] ZHANG C, FØYEN S, SUUL J A, et al. Modeling and analysis of SOGI-PLL/FLL-based synchronization units: stability impacts of different frequency-feedback paths[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2047-2058.
- [10] MANSOUR M Z, MOHAMMED N, RAVANJI M H, et al. Output impedance derivation and small-signal stability analysis of a power-synchronized grid following inverter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2696-2707.
- [11] 罗魁, 郭剑波, 王伟胜, 等. 跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1262-1280.
LUO Kui, GUO Jianbo, WANG Weisheng, et al. Review of impact of grid following variable renewable energy supplementary frequency control on frequency stability and small-disturbance synchronization stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1262-1280.
- [12] SAN G, ZHANG W, LUO R, et al. Small-signal multi-frequency model for grid-connected inverter system with PWM effect[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 307-317.
- [13] YU J, QI Y, DENG H, et al. Evaluating small-signal synchronization stability of grid-forming converter: a geometrical approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9087-9098.
- [14] 胡祺, 付立军, 马凡, 等. 弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 98-108.
HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Small signal synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 98-108.
- [15] 姜齐荣, 赵崇滨. 并网逆变器的电磁暂态同步稳定问题[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 415-428.
JIANG Qirong, ZHAO Chongbin. Electromagnetic transient synchronization stability with grid-connected inverters[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 415-428.
- [16] 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.
- [17] 王志洁, 李书江, 胡红阳, 等. 构网型光伏发电系统振荡模态分析及抑制策略[J]. 电力电子技术, 2022, 56(12): 82-86.
WANG Zhijie, LI Shujiang, HU Hongyang, et al. Oscillation mode analysis and suppression strategy of grid-forming photovoltaic power generation system[J]. Power Electronics, 2022, 56(12): 82-86.
- [18] HUANG Y, YUAN X, HU J, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [19] 王凯, 原熙博, 王晖, 等. 弱电网下逆变器并网系统失稳的两种诱因[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1230-1242.
WANG Kai, YUAN Xibo, WANG Hui, et al. Two causes of the inverter-based grid-connected system instability in weak grids[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1230-1242.
- [20] 康勇, 林新春, 郑云, 等. 新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4506-4515.
KANG Yong, LIN Xinchun, ZHENG Yun, et al. The static stable-limit and static stable-working zone for single-machine infinite-bus system of renewable-energy grid-connected converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4506-4515.
- [21] 董炜, 杨超然, 辛焕海, 等. 变流器并网系统复电路模态功率分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 1919-1933.
DONG Wei, YANG Chaoran, XIN Huanhai, et al. Complex circuit modal power analysis of grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7):

- 1919-1933.
- [22] XIN H, HUANG L, ZHANG L, et al. Synchronous instability mechanism of P-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5206-5207.
- [23] HUANG L, XIN H, ZHANG L, et al. Synchronization and frequency regulation of DFIG-based wind turbine generators with synchronized control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1251-1262.
- [24] 王顺亮, 孙瑞婷, 马俊鹏, 等. 弱电网下并网逆变器正交功率同步控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8475-8485.
WANG Shunliang, SUN Ruiting, MA Junpeng, et al. Orthogonal power synchronization control for grid-connected inverters under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8475-8485.
- [25] 宋平岗, 周振邦, 董辉. 采用虚拟惯性的 MMC-RPC 功率同步控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4014-4021.
SONG Pinggang, ZHOU Zhenbang, DONG Hui. Power synchronization control strategy with virtual inertia of MMC-RPC[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4014-4021.
- [26] HUANG L, XIN H, YUAN H, et al. Damping effect of virtual synchronous machines provided by a dynamical virtual impedance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 570-573.
- [27] HE X, GENG H, LI R, et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1612-1623.
- [28] 陈俊儒, 李冠群, 刘牧阳, 等. 电网阻抗比对跟网变换器同步稳定性的影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2331-2338.
CHEN Junru, LI Guanqun, LIU Muyang, et al. Influence mechanism of R/X ratio on synchronization stability of grid-following converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2331-2338.
- [29] 高家元, 涂春鸣, 肖凡, 等. 弱电网下基于 SISO 阻抗模型的 LCL 滤波并网逆变器在不同域下的稳定性差异分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6777-6789.
GAO Jiayuan, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Analysis of stability differences of LCL-filter grid-connected inverters in different domains based on SISO impedance model in weak grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6777-6789.
- [30] CHENG C, XIE S, QIAN Q, et al. Observer-based single-sensor control schemes for LCL-filtered grid-following inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 4887-4900.
- [31] 熊佳旺, 孔力, 叶华, 等. 弱电网中锁相环型并网变换器非线性暂态稳定解析分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 76-84.
XIONG Jiawang, KONG Li, YE Hua, et al. Analytical analysis on nonlinear transient stability of phase-locked loop type grid-connected converter in weak power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 76-84.
- [32] YANG H, EGGERS M, TESKE P, et al. Comparative stability analysis and improvement of grid-following converters using novel interpretation of linear time-periodic theory[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 7049-7061.
- [33] 汪娟娟, 余震霄, 吴秋媚, 等. 考虑 MAF 延时和前馈补偿的高压直流快速锁相环[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 535-547.
WANG Juanjuan, YU Zhenxiao, WU Qiumei, et al. HVDC fast phase-locked loop considering MAF delay and feedforward compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 535-547.
- [34] ZAREI S F, MOKHTARI H, GHASEMI M A, et al. Control of grid-following inverters under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 184-192.
- [35] CHEN J, LIU M, GENG H, et al. Impact of PLL frequency limiter on synchronization stability of grid feeding converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2487-2490.
- [36] XIN H, ZHAO R, ZHANG L, et al. A decentralized hierarchical control structure and self-optimizing control strategy for F-P type DGs in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 3-5.
- [37] HE J, HUANG L, WU D, et al. Frequency support from PMSG-based wind turbines with reduced DC-link voltage fluctuations[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(3): 296-302.
- [38] HUANG L, XIN H, WANG Z, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [39] HUANG L, XIN H, LI Z, et al. Grid-synchronization stability analysis and loop shaping for PLL-based power converters with different reactive power control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1):

- 501-516.
- [40] HUANG L, XIN H, WANG Z. Damping low-frequency oscillations through VSC-HVdc stations operated as virtual synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5803-5818.
- [41] 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.
- [42] 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 宫泽旭, 等. 锁相环主导下变流器振荡问题的阻抗分析方法: 标称性与鲁棒性[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(15): 6035-6046.
- YAERMAIMAITI Ailixier, XIN Huanhai, GONG Zexu, et al. Impedance analysis method of oscillation issues in converter caused by phase-locked loop: nominal performance and robustness[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(15): 6035-6046.
- [43] 宫泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(二): 导出机理与稳定性分类探讨[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5126-5139.
- GONG Zexu, YAERMAIMAITI Ailixier, XIN Huanhai, et al. Small signal stability analysis of grid-connected equipment in power system (part II): discussion on mechanism derivation and classification of stability[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5126-5139.
- [44] 宫泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(一): 机理模型与稳定判据适用性[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(12): 4405-4418.
- GONG Zexu, YAERMAIMAITI Ailixier, XIN Huanhai, et al. Small signal stability analysis of grid-connected equipment in power system (part I): mechanism model and adaptation of stability criterion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(12): 4405-4418.
- [45] WU T, LIU Z, LIU J, et al. A unified virtual power decoupling method for droop-controlled parallel inverters in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(8): 5587-5603.
- [46] HANS F, SCHUMACHER W, HARNEFORS L. Small-signal modeling of three-phase synchronous reference frame phase-locked loops [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(7): 5556-5560.
- [47] 曾志杰, 肖华锋, 高博, 等. 结合阻抗比与振荡阻尼特征的并网系统谐波谐振稳定性分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7201-7211.
- ZENG Zhijie, XIAO Huafeng, GAO Bo, et al. Stability analysis method of harmonic resonance of grid-connected generation system based on impedance ratios and oscillation damping[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7201-7211.
- [48] 袁小明, 李胜. 电力系统中变换器电流时间尺度动态过程分析的幅值/频率调制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(15): 4732-4744.
- YUAN Xiaoming, LI Sheng. An amplitude/frequency modulation based method of voltage source converter for power systems dynamic analysis in current control timescale[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(15): 4732-4744.
- [49] WANG C, WANG Z, WU Q, et al. An improved impedance/admittance analysis method considering collector subsystem transformation in converter-integrated power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5963-5966.
- [50] NI K, GAN C, HU Y, et al. Input-output small-signal stability analysis of a PLL-free direct power-controlled partially power-decoupled more-electric shipboard propulsion system[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1672-1686.
- [51] 孙华东, 方诗卉, 徐式蕴, 等. 基于 Nyquist 阵列理论的风电并网系统小扰动稳定分析及控制[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3124-3133.
- SUN Huadong, FANG Shihui, XU Shiyun, et al. Power system small signal stability analysis and control based on Nyquist array theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3124-3133.
- [52] KAMALA S, GORLA N B Y, PANDA S K. Small-signal stability improvement of microgrid with battery energy storage system based on real-time grid impedance measurement[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(2): 2537-2546.
- [53] WEN B, DONG D, BOROYEVICH D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(1): 26-38.
- [54] DU W, BI J, WANG T, et al. Impact of grid connection of large-scale wind farms on power system small-signal angular stability[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015, 1(2): 83-89.
- [55] WEI S, ZHOU Y, HUANG Y. Synchronous motor-generator pair to enhance small signal and transient stability of power system with high penetration of renewable energy[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 11505-11512.
- [56] OJO Y, LAIB K, LESTAS I. On the synchronization of

- the Kuramoto-type model of oscillators with lossy couplings[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2023, 7: 1225-1230.
- [57] LI C, DU Z. A novel method for computing small-signal stability boundaries of large-scale power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 877-883.
- [58] 董炜, 辛焕海, 李子恒, 等. 变流器并网系统振荡与原-对偶复电路分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(22): 6500-6515.
DONG Wei, XIN Huanhai, LI Ziheng, et al. Primal-dual complex circuit of grid-connected converters for oscillation analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(22): 6500-6515.
- [59] 宗皓翔, 张琛, 吕敬, 等. MMC 多人多出阻抗及其在不对称小扰动稳定分析中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(15): 5649-5663.
ZONG Haoxiang, ZHANG Chen, LÜ Jing, et al. MMC MIMO impedance and its application in the asymmetric small-signal stability analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5649-5663.
- [60] MANSOUR M Z, RAVANJI M H, KARIMI A, et al. Small-signal synchronization stability enhancement of grid-following inverters via a feedback linearization controller[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(5): 4335-4344.
- [61] 黄林彬, 辛焕海, 鞠平, 等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(9): 10-25.
HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 10-25.
- [62] 张祥宇, 朱正振, 付媛. 风电并网系统的虚拟同步稳定分析与惯量优化控制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(8): 2922-2932.
ZHANG Xiangyu, ZHU Zhengzhen, FU Yuan. Virtual synchronous stability analysis and optimized inertia control for wind power grid-connected system[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(8): 2922-2932.
- [63] 柯贤波, 孙谊嫒, 任冲, 等. 弱联络条件下并网虚拟同步发电机小扰动稳定分析[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(9): 101-106.
KE Xianbo, SUN Yiqian, REN Chong, et al. Analysis of small-signal stability of grid-connected VSG under weak grid connection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(9): 101-106.
- [64] 王冠中, 董炜, 辛焕海, 等. 基于广义短路比的电力电子多馈入系统小扰动概率稳定评估[J]. *电力系统自
动化*, 2018, 42(18): 17-24.
WANG Guanzhong, DONG Wei, XIN Huanhai, et al. Probabilistic stability evaluation of small disturbances for power electronic multi-infeed system based on generalized short-circuit ratio[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(18): 17-24.
- [65] HUANG L, XIN H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 578-591.
- [66] 陈民权, 康卓然, 张谦, 等. 电力系统大干扰稳定性分析方法综述[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(2): 10-24.
CHEN Minquan, KANG Zhuoran, ZHANG Qian, et al. A review of large disturbance stability analysis methods in power system[J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(2): 10-24.
- [67] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1672-1693.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1672-1693.
- [68] 易相彤, 黄文, 沈超, 等. 锁相环同步型变流器并联系统暂态同步稳定分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(17): 6338-6346.
YI Xiangtong, HUANG Wen, SHEN Chao, et al. Transient synchronization stability analysis of paralleled converter systems with phase-locked loop[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6338-6346.
- [69] 张怡, 张恒旭, 李常刚, 等. 深度学习在电力系统频率分析与控制中的应用综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(10): 3392-3406.
ZHANG Yi, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Review on deep learning applications in power system frequency analysis and control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(10): 3392-3406.
- [70] 汪小明, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于能量函数法的电网暂态稳定性分析[J]. *电网技术*, 2011, 35(8): 114-118.
WANG Xiaoming, LIU Dichen, WU Jun, et al. Energy function-based power system transient stability analysis[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(8): 114-118.
- [71] 张恒旭, 曹永吉, 张怡, 等. 电力系统频率动态行为衍变与分析方法需求综述[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51(5): 42-52.
ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and

- analysis method requirements of power system[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(5): 42-52.
- [72] 张宇, 张琛, 蔡旭, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性分析: 稳定域估计与镇定控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7871-7883.
- ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Transient grid-synchronization stability analysis of grid-tied voltage source converters: stability region estimation and stabilization control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7871-7883.
- [73] 曾平, 张琛, 李征. 电网故障期间全功率风电机组的暂态同步稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5935-5947.
- ZENG Ping, ZHANG Chen, LI Zheng. Control strategy of transient synchronization stability of full-scale wind turbines during grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5935-5947.
- [74] 裴金鑫, 姚骏, 黄森, 等. 电网短路故障下新能源并网变换器的暂态同步机制及其自适应稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5922-5934.
- PEI Jinxin, YAO Jun, HUANG Sen, et al. Transient synchronization mechanism and adaptive stability control strategy for renewable energy grid-connected converter under grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5922-5934.
- [75] 袁豪, 袁小明. 用于系统直流电压控制尺度暂态过程研究的电压源型并网变换器幅相运动方程建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6882-6892.
- YUAN Hao, YUAN Xiaoming. Modeling and characteristic analysis of grid-connected VSCs based on amplitude-phase motion equation method for power system transient process study in DC-link voltage control timescale[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6882-6892.
- [76] 姜卫同, 胡鹏飞, 尹瑞, 等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 124-133.
- JIANG Weitong, HU Pengfei, YIN Rui, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 124-133.
- [77] 苏大威, 徐伟, 张琦兵, 等. 基于阻抗分析法的风储并网系统谐波稳定性分析[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 64-71.
- SU Dawei, XU Wei, ZHANG Qibing, et al. Harmonic stability analysis of wind-storage grid-connected system based on impedance analysis method[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 64-71.
- [78] WANG X, WU H, WANG X, et al. Transient stability analysis of grid-following VSCs considering voltage-dependent current injection during fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2749-2760.
- [79] PEI J, YAO J, LIU Y, et al. Modeling and transient synchronization stability analysis for PLL-based renewable energy generator considering sequential switching schemes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2165-2179.
- [80] 许诒翊, 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): 3586-3594.
- 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): 3586-3594.
- [81] HUANG S, YAO J, PEI J, et al. Transient synchronization stability improvement control strategy for grid-connected VSC under symmetrical grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 4957-4961.
- [82] 胡宇飞, 田震, 查晓明, 等. 构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 121-131.
- HU Yufei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Impedance stability analysis and promotion strategy of islanded microgrid dominated by grid-connected and grid-following converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 121-131.

(编辑:孙亚彤)