

基于场景模拟的高比例新能源电网 暂态稳定特性探讨

喻梦洁^{1,2}, 鲍颜红^{1,2}, 张金龙^{1,2}, 吴峰^{1,2}, 任先成^{1,2}, 徐泰山^{1,2}

(1. 国网电力科学研究院有限公司(南瑞集团有限公司), 江苏省 南京市 211106;

2. 电网运行风险防御技术与装备全国重点实验室, 江苏省 南京市 211106)

Exploration of Transient Stability Characteristics of High Proportion New Energy Grid Based on Scenario Simulation

YU Mengjie^{1,2}, BAO Yanhong^{1,2}, ZHANG Jinlong^{1,2}, WU Feng^{1,2}, REN Xiancheng^{1,2}, XU Taishan^{1,2}

(1. State Grid Electric Power Research Institute (NARI Group Corporation), Nanjing 211106, Jiangsu Province, China;

2. State Key Laboratory of Technology and Equipment for Defense Against Power System Operational Risks, Nanjing 211106, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT : With the high proportion of new energy connected to the power grid, the transient stability characteristics and evolution of the system may undergo profound changes. Based on the scenario simulation, this paper discusses the transient stability characteristics of the system after the high proportion of new energy is connected to the large power grid. Firstly, the research scenario is constructed based on the typical off-line peak load mode of Northwest Power Grid., in which new energy accounts for up to 60%; Secondly, the impact of grid-following new energy units and grid-forming new energy units on the transient stability of the system was analyzed, and the influence of inertia parameters and regulation time of grid-forming units was considered; Finally, the impact of the proportion of grid grid-following, grid-forming new energy units and the configuration of grid-structured units on the stability of the large power grid was discussed in detail. This paper provides a useful exploration for the transient stability characteristics of high proportion of new energy power grid. And the relevant conclusions can expand the cognition of the transient stability characteristics of the actual power system with high proportion of new energy access, and provide reference and thinking for ensuring the safe and stable operation of the system and exploring the future research direction.

KEY WORDS: scenario simulation; high proportion of new energy; grid-following new energy unit; grid-forming new

energy unit; large power grid; transient angle stability

摘要: 随着高比例新能源接入电网, 系统暂态稳定特性及其演化形态可能会发生深刻变化。采用场景模拟的方式, 探讨了高比例新能源接入大电网后系统的暂态稳定特性。首先, 以西北电网离线高峰负荷典型方式为基础构建研究场景, 该场景新能源占比高达 60%; 其次, 分析了跟网型新能源机组和构网型新能源机组接入对系统暂态稳定问题的影响, 并考虑了构网型新能源机组惯量参数及其调节时间的影响; 最后, 详细讨论了跟网型、构网型新能源机组占比以及构网型机组配置对大电网稳定问题的影响。对高比例新能源电网暂态稳定特性做了有益探索, 相关结论可以拓展现有对高比例新能源接入实际电力系统暂态稳定特性的认知, 为保障系统安全稳定运行以及探索未来研究方向提供了借鉴和思考。

关键词: 场景模拟; 高比例新能源; 跟网型新能源机组; 构网型新能源机组; 大电网; 暂态功角稳定

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1286

0 引言

构建新型电力系统, 是推动我国能源低碳转型, 实现“双碳”目标的关键举措^[1-2]。随着新型电力系统建设进程的不断推进, 新能源占比大幅提升, 系统安全稳定问题愈发严重^[3]。明确高比例新能源大电网暂态稳定特性, 是实现系统安全风险预防控制^[4]、广域协调控制^[5]的基础, 对于保障大电网安全稳定运行具有重要意义。

近年来, 围绕新能源接入系统的暂态稳定特性, 国内外已开展了许多研究^[6-7], 其中最主流的做法是将等面积法则和仿真分析法相结合, 定量、定性分析系统暂态稳定特性^[8-10]。例如, 文献[8-9]基

基金项目: 国家自然科学基金项目: “新型电力系统调度计划决策基础理论与方法”(U24B6009)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China: “Fundamental Theory and Methodology of Decision-making for New Power System Scheduling”(U24B6009).

于扩展等面积定则,研究双馈风机接入两机系统的暂态稳定机理,同时还讨论了同步机出力、风电渗透率和接入位置等因素对系统稳定性的影响。文献[11]在 PSD-BPA 中搭建风火打捆交直流混联外送系统,分析了风电比例和直流控制方式对暂态稳定特性影响。文献[12]对 WSCC 3 机 9 节点系统和新英格兰 10 机 39 节点系统开展分析,揭示了高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理。这些研究能在一定程度上满足理论研究的需求,但研究场景与实际复杂电力系统仍存在差距。对此,有学者针对实际电网开展了相关研究。文献[13]以东北电网实际网架结构为基础,研究高渗透率风电系统中常规火电机组与风电机组对系统暂态稳定性的影响,并归纳总结了其内在规律。文献[14]应用实际电网拓扑和数据,构建适用于功角稳定特性研究的机电暂态仿真标准算例,同时量化分析了新能源渗透率、机组接入位置和控制策略等因素对稳定水平的影响。

上述研究已取得长足进展,但其分析的新能源机组多为跟网型新能源机组(下文简称跟网型机组),随着高比例新能源接入电网,同步发电机占比进一步降低,弱电网下跟网型机组的稳定性将很难保证。为保障系统的稳定运行,需要配置一定的构网型新能源机组(下文简称构网型机组)^[15]。为此,学术界对构网型机组稳定性及其对系统的影响开展了大量研究,并取得了显著成效^[16-18]。例如,文献[19]在考虑阻尼特性的基础上采用等面积法则,从能量角度揭示构网型并网逆变器控制参数对暂态稳定性的影响机理,并解析得到暂态稳定边界,对构网型机组控制参数的设计具有重要的指导作用。但值得注意的是,这些研究均是基于构网型机组接入单机无穷大系统,或含构网型机组的两机系统开展的^[20],鲜有针对构网型机组接入多机系统的研究。对此,国外有学者进行了初步尝试^[21-22],但相关研究结论均是在一定假设前提下得到的,难以全面反映实际高比例新能源大电网的稳定特性。

西北电网作为我国首个以新能源为发电主体的区域电网,截至 2023 年底,其新能源发电装机容量已达 2.1 亿 kW,新能源占比超过 50%^[23],属于典型的高比例新能源交直流混联大电网。严重故障后存在暂/动态失稳、高/低频、低电压/过电压、次同步振荡等问题,基本覆盖了各类安全稳定问题,极具代表性。为此,本文以西北电网为分析对象,基于 PSCAD 仿真工具,探讨了高比例新能源接入大电网的暂态稳定特性。首先,分析了跟网型、

构网型机组对系统暂态稳定特性的影响,并详细讨论了构网型机组控制参数的影响;然后,分析了不同占比的跟网型、构网型机组对系统暂态稳定性及其演化形态的影响。最后,详细讨论了构网型机组配置对系统稳定性的影响。分析结果一方面可以拓展现有对高比例新能源接入实际电力系统暂态稳定特性的认知,另一方面也能为未来大电网新能源机组尤其是构网型机组优化配置、风险预防控制及广域协调控制提供参考依据。

1 研究系统和场景

1.1 系统概况

以西北电网离线高峰负荷典型方式为基础,保持 750kV 厂站和主网架不变对网络进行等值简化,在此基础上将所有节点的注入功率缩小 10 倍,按照系统缩减前后节点电压水平和安全稳定特性不变的原则修改网络参数(包括交流线路、变压器、高抗、串补、无功补偿、直流网络参数等),得到如附录图 A1 所示的仿真系统。缩减后系统 750kV 主变 69 台,750kV 线路 159 条,母线数 358 个,计算节点总数为 525 个。

1.2 分析场景

系统缩减后总装机容量为 19690MW,通过以下方式提高新能源占比:1) 增加区域 X、G、Q、N、S 新能源机组出力,同容量降低水火电机组出力;2) 等比例降低 20% 的负荷,同时降低负荷近区水火电机组的出力,提高新能源出力占比;3) 降低直流外送功率,同时降低直流配套火电机组的出力,降低直流受入功率,增加区域 S 新能源机组出力,进一步提高新能源出力的占比。

由此得到的仿真场景新能源机组出力占比 60.4%,常规机组出力占比 39.6%,分别包括火电机组 52 台,水电机组 10 台,跟网型新能源机组 30 台,构网型新能源机组 11 台(构网型机组按容量最小原则配置),机组详细配置情况见附录图 A1。附录表 A1 为该场景下西北区域电网机组出力概况。

2 高比例新能源电网的暂态稳定问题

一般地可以将电力系统暂态稳定问题分为暂态功角稳定和暂态电压稳定两大类^[24],本文分析过程中重点关注高比例新能源大电网的暂态功角稳定特性。区域 X 和区域 G 的输电断面作为西北电网的关键断面,集中体现了电网中的薄弱环节,当其发生故障时,可能存在安全稳定隐患。为此假设 XHM-GDH 输电通道发生 N-1 故障,具体故障描述

为:在 $t=2.00\text{s}$ 时 XHM-GDH 单回输电线路发生三相短路接地故障,故障持续时间 $t_s=0.08\text{s}$, $t=2.08\text{s}$ 时断路器动作将故障线路切除。本文后续分析均以位于 QLC 的水电机组为参考机组。

2.1 跟网型新能源机组影响

传统电力系统的同步问题为各同步发电机组间内电势的功角差有界且频率趋于一致,由同步机组间的转子运动方程以及励磁绕组决定,本质上是电压源之间的同步^[25-28]。跟网型机组采用矢量电流控制实现有功功率和无功功率的解耦,并通过锁相环(phase-locked loop, PLL)实现对电网的同步追踪,对外表现为受控电流源,对系统的同步稳定问题主要呈负荷特性^[29-31]。因此,跟网型机组本身不直接参与系统同步,而是通过能量注入的形式间接影响系统常规机组的同步稳定性。

在实际工程中惯量控制应用较少,因而分析过程中不考虑虚拟惯量控制,同时将锁相环视为理想环节,由此搭建的跟网型机组控制策略如图 1 所示^[32]。考虑变流器内部功率半导体器件以及电容、电感等存储元件载流能力,不同电网条件下注入变流器的暂态能量不同,变流器的控制策略的侧重点也有差异,主要包括常规控制指令和暂态控制指令两部

分^[33]。图 1 中物理量及变量的含义参见文献^[32]。

在电网正常运行或浅度故障时,系统故障电流和电容电压还没有超过功率半导体器件以及储能元件的限值,跟网型机组采用转子转速控制、直流电压控制和交流电流控制等常规控制,此时变流器控制的主要目的是保证较高的能量转换效率和灵活的并网运行性能。故障发生后,跟网型机组能迅速响应电网电压的动态变化维持输出功率基本不变^[32],即跟网型机组注入系统的能量基本不变,不会对系统同步发电机组暂态同步稳定性造成影响。正常情况下,系统短路比满足运行要求,电网支撑能力较强,锁相环基本都处于理想状态,跟网型机组对电网同步稳定性的影响不大。

在电网电压跌落较深时,为了保护功率半导体器件以及储能元件不过载,同时保证风电机组具备一定的低电压穿越能力(low voltage ride through, LVRT),跟网型机组控制器通常会切换为暂态控制并投入相应的保护电路^[32-37],如图 1 中红色所示的紧急变桨控制、低电压穿越期间和结束后的有功及无功控制策略(即暂态电流指令控制),以及直流卸荷回路(Chopper)、撬棒(Crowbar)保护等硬件保护电路。此时,暂态电流指令控制参数、Chopper 切入

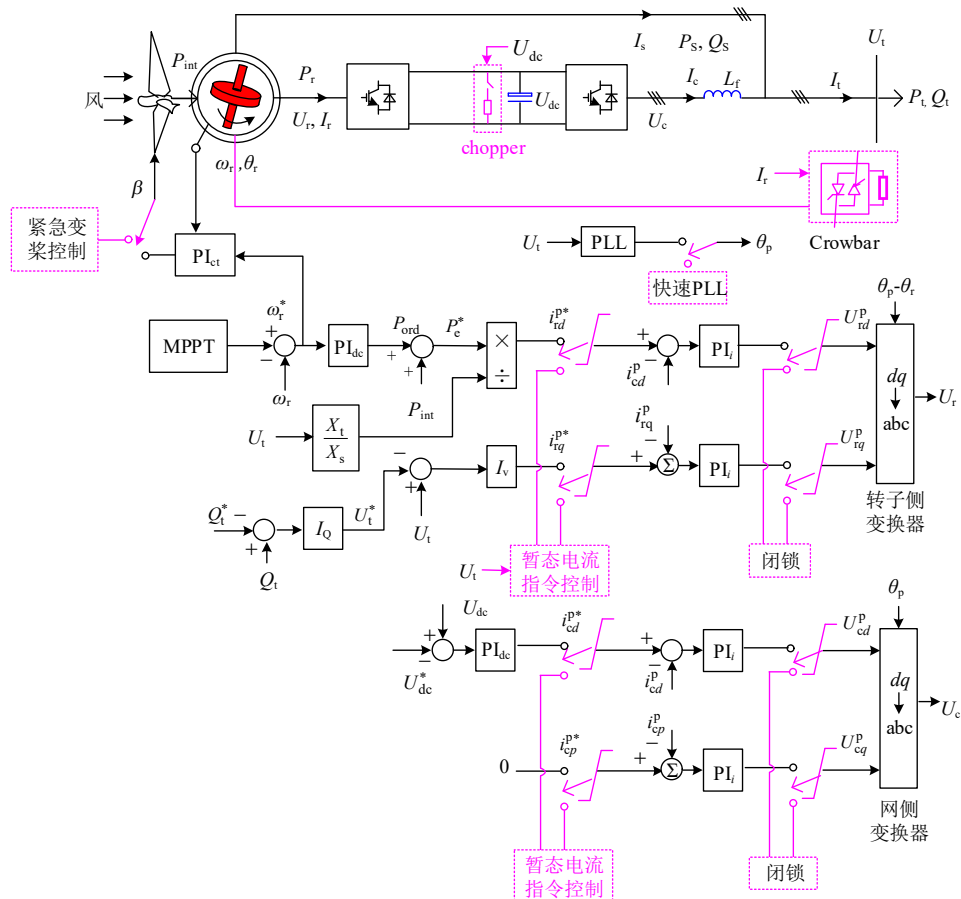


图 1 跟网型双馈风机控制策略^[32]

Fig. 1 Control strategy for grid-following doubly fed wind turbines^[32]

阈值,以及撬棒电阻等参数变化可能会对跟网型机组注入能量产生影响,继而对电网同步稳定性造成影响。目前针对这方面内容已开展了大量研究,并取得了显著成效,本文不再具体讨论。

2.2 构网型新能源机组影响

2.2.1 未触发限流控制

随着新能源占比不断提升,电网支撑能力大幅降低,弱电网环境下跟网型机组存在较大的失稳风险,构网型机组的广泛使用已成为必然趋势^[38]。构网型机组大多采用模拟同步机物理特性的功率同步控制策略,不需要借助锁相环便可实现同步,其本质上可以等效为一个串联虚拟阻抗的幅值和相角均受控的电压源。其中,电压源的幅值通过无功功率控制得到,相角通过有功功率控制或直流电压控制得到^[39-40],其典型控制框图及等效电路如图2所示。图中: U_0 、 I_s 为构网型机组的输出电压和电流, U_{PCC} 、 I 和 U_g 分别为并网点电压、电流以及电网电压; P 、 Q 为构网型机组输出的有功、无功; L_v 、 C_v 、 R_v 为滤波用的电感、电容和电阻, L_g 、 R_g 为输电线路电感和电阻。本文使用的构网型机组的有功控制环节为虚拟同步机控制,无功控制环节为下垂控制,详细控制架构可参考文献[40],这里不

再赘述。

一般情况下,构网型机组与常规同步发电机相似,以同步机暂态特性为基础的传统暂态稳定分析部分结论(如暂态稳定问题分类、稳定机理、失稳形态等)均可以继续沿用^[40]。忽略线路电阻的影响,考虑电网阻抗呈纯感性,构网型机组输出的有功功率和无功功率如式(1)所示,式中 $B_g=1/j\omega(L_v+L_g)$,此时构网型机组的功率特性与传统同步发电机的表达形式基本一致。

$$\begin{cases} P = EU \sin \delta B_g \\ Q = E^2 B_g - EU_g \cos \delta B_g \end{cases} \quad (1)$$

根据图2(b),以 U_g 为参考电压,画出构网型机组内电势与电网电压、电流的相位图,如附录图A2所示。此时,构网型机组内电势与电网电压、电流的关系如式(2)~(4)所示,由此可推导出内电势幅值的计算如式(5)所示。

$$U_g + \dot{I}X_g = \dot{U}_{pcc} \quad (2)$$

$$\dot{E} = U_{pcc} + \dot{I}X_f \quad (3)$$

$$\dot{E} = (1 + \frac{X_f}{X_g})\dot{U}_{pcc} - \frac{X_f}{X_g}U_g \quad (4)$$

$$E = \sqrt{(1 + \frac{X_f}{X_g})^2 \dot{U}_{pcc}^2 - (\frac{X_f}{X_g}U_g \sin \delta)^2} - \frac{X_f}{X_g}U_g \cos \delta \quad (5)$$

从控制角度,有功环节模拟常规发电机组转子运动方程,通过调节功角 δ 使输出功率 P 达到参考值;无功环节模拟常规发电机组无功-电压下垂特性,通过调节 E 使无功功率达到参考值。根据式(5)可知,构网型机组内电势幅值 E 会随着 δ 的变化而变化,因而无功环节也会受 δ 参数变化的影响,导致构网型机组有功功率、无功功率相互耦合。而常规发电机组内电势幅值相对稳定, E 受 δ 的影响较小,因而有功功率和无功功率相对较为独立。

图3为相同场景下将区域X中的构网型机组直接替换为火电机组前后的功角曲线,替换前后系统潮流不变。由图可以看出,若直接将原始场景中的构网型机组替换为火电机组,系统稳态运行状态下的初始功角会显著增加,故障后系统同步稳定性大

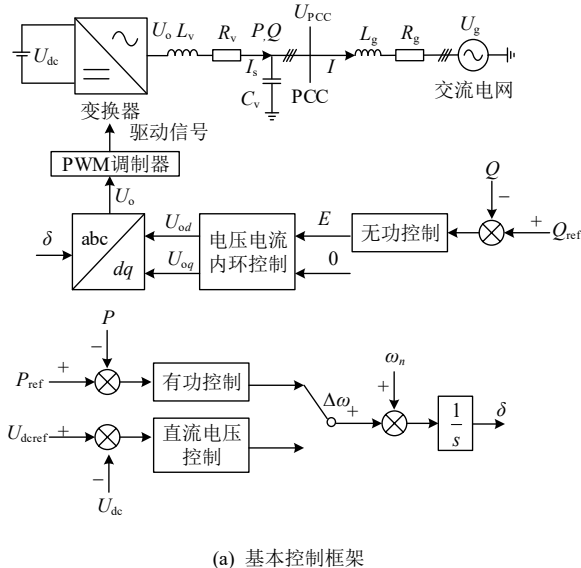


图2 构网型机组典型控制框图

Fig. 2 Typical control block diagram for grid-forming new energy units

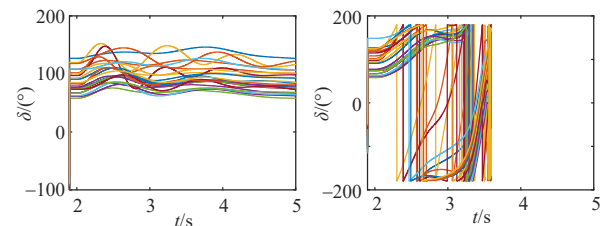


图3 区域X的功角曲线
Fig. 3 power angle δ curves in regional X

大降低。

主要有以下两点原因,一是因同步发电机电磁耦合需要,其内部包含大量定子绕组、励磁绕组以及阻尼绕组,导致同步发电机内部阻抗($X_{d/q}>2.0$)远大于构网型机组的滤波阻抗(0.2~0.5)。由式(1)可知,当系统结构不变的情况下,同步发电机组替换构网机组后,为保持功率输出一致,其稳态运行时的功角将变大,不利于系统功角稳定。二是构网型机组具有控制策略主导的特点,其控制参数灵活可调、响应速度快^[28],而同步机组的暂态特性由机械转子运动方程描述,呈现出物理属性主导的特点,其动态过程变化慢、频带窄^[41-42],因而不利于系统的同步稳定。由此可见,虽然构网型机组有功无功耦合会对系统同步稳定性造成不利影响,但构网型机组在调节能力和稳定性方面仍具有显著优势。

2.2.2 触发限流控制

受变流器过流能力限制,构网型机组还需要在电压电流内环控制环节设置电流限幅环节,如附录图 A3 中红色框所示^[43-44],图中 $I_{\max}$ 为限流模块阈值。根据同步控制策略和限流方式的不同,构网型机组会表现出不同的特性。若构网型机组在限流模式下采用 PLL 同步(即混合同步控制策略),其暂态稳定形态与 2.1 节对跟网型机组的分析类似,本节不再赘述。

若构网型机组在限流模式下继续使用功率同步控制策略,根据限流方式的不同,构网型机组可能会表现出不同的特性^[45-48]。限流后,构网型机组内电势幅值降低,同时内电势角度也在变化,即在原有 δ 的基础上还叠加了限流环节的角度 φ , $\varphi = \arctan(I_{sdref}/I_{sqref})$ 。 φ 根据电流限幅环节的控制策略不同而变化,目前常用的电压限幅控制策略包括 d 轴优先、 q 轴优先、 d/q 轴等比例限幅 3 种控制策略。限流后电压环失去作用,考虑电流环为理想环节,此时构网型机组输出有功功率如式(6)(7)所示。

$$P = U_g I_{\max} \cos(\delta + \varphi) \quad (6)$$

$$I_{\max} = \sqrt{I_{sdref}^2 + I_{sqref}^2} \quad (7)$$

由此得到限流后构网型机组的功角曲线,如附录图 A4 所示。图中曲线 I、II 分别表示未触发限流和触发限流后构网机组功率特性曲线, A1、A2 分别为加速面积和减速面积。为方便起见,图中 P_{ref} 为理想状态下故障限流后稳定的有功参考值,实际限流过程中不同控制策略所对应的有功参考值也是动态变化的。可以看到 q 轴优先具有较大的减速面积,更有利于系统稳定,因此本文仿真场景中使

用 q 轴优先的限流控制策略。

限流后的构网型机组与传统机组存在区别,但仍可视为电压降低的电压源。其本质相当于同步发电机串联了一个较大的时变阻抗,因而其本身的同步稳定性将更差,会对电网稳定性造成一定影响。一方面,构网型机组限流后其输出的有功功率降低,相应地所属区域常规同步机组的电磁功率会增大,导致常规机组加速面积减小,减速面积变大。若其位于临界机群,则有利于系统稳定;反之若位于余下机群,则不利于系统稳定。另一方面,构网型机组限流也会导致其输出的无功功率降低,进而降低系统电压支撑能力,导致系统传输功率受到限制,不利于系统稳定性。

在大电网下,随着故障距离的增加电压跌落程度逐渐变轻,仅距离故障较近的部分构网型机组会处于限流状态,因而对系统同步稳定形态影响有限。如附录图 A5 所示为仿真得到的 XHM-GDH 发生 N-1 故障时,构网型机组限流模块的动作情况(图中“1”表示激发状态,“0”表示闭锁状态),此时 $I_{\max}=1.5$ 。可以看出 XHM、XYD、XST,以及 GDH 的构网型机组的限流模块发生了动作,且 XHM 机组限流模块动作比较频繁。该场景下系统常规机组和构网型机组的功角曲线如图 4 所示。

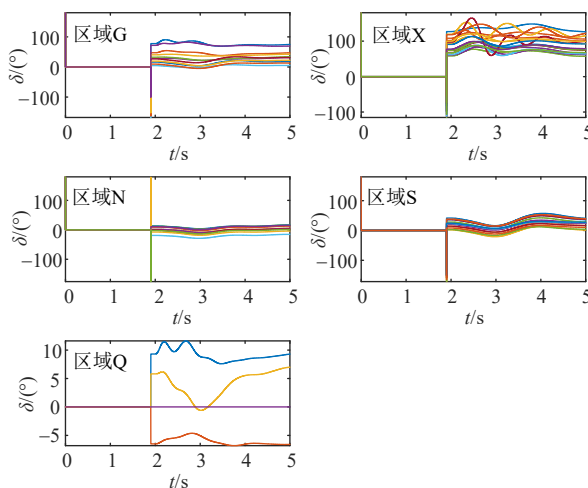


图4 西北电网发电机组功角曲线

Fig. 4 Power angle δ curves of generators for Northwest grid

其中构网型机组的功角为有功环节生成的角度,该值与构网机组内电势实际相角相差一个角度。比较故障后常规机组和构网型机组的功角曲线可以看出,两者的差异并不是很大。并且系统仍然可以分为两群,其中区域 X 的机组位于临界群,区域 S、N 的机组位于余下群,区域 G、Q 的机组介于二者之间,有部分机组位于临界群,部分机组位于余下群。可见在该场景下系统稳定形态与以同步

机为传统的电力系统表现形式差别不大。

为进一步分析构网型机组限流对系统稳定性的影响,本文比较构网型机组限流模块阈值 $I_{\max}$ 不同时的结果。附录表 A2 为 $I_{\max}$ 取不同值时,西北电网构网型机组动作情况。表中“√”表示限流模块动作,“×”表示限流模块不动作。可以看到,当限流阈值取 3.0 时,系统构网型机组限流模块均未动作,对应不限流的场景。并且随着构网型机组限流模块阈值的降低,故障后进入限流状态的机组会越多,这会直接影响系统电压支撑能力和系统稳定性。

图 5、图 6 为限流模块阈值 $I_{\max}$ 取不同值时,系统最大功角差及其对应机组并网点电压监测结果,此时最大功角差对应机组为 XJH 的火电机组。由图 5 可以看出,随着限流阈值的降低,系统最大功角差逐渐变大,其中 $I_{\max}=1.5$ 对应的最大功角差最大,其值为 165.07° , $I_{\max}=2.0$ 次之为 154.49° , $I_{\max}=3.0$ 时最大功角差最小为 147.83° ;由图 6 可知,随着限流阈值的降低,系统电压支撑能力也随之降低, $I_{\max}$ 取 3.0、2.0、1.5 时系统最大功角差对应机组并网点电压最小值分别为: 0.4567、0.4463、0.4344pu。此外还可以看到,故障恢复阶段的限流阈值对系统电压支撑能力影响更甚,当 $t=2.425\text{s}$ 时(对应图 6 中黑色虚线), $I_{\max}$ 对应的电压为: 0.9139、0.8632、0.7865pu。

此外,构网型机组限流控制策略通过影响系统的电压支撑能力也会影响系统稳定性。图 7 所示为

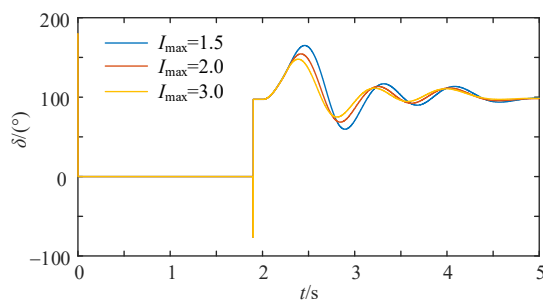


图 5 XJH 火电机组功角曲线

Fig. 5 Power angle curve of XJH thermal power unit

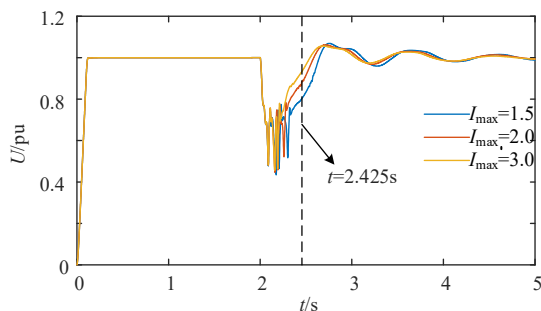
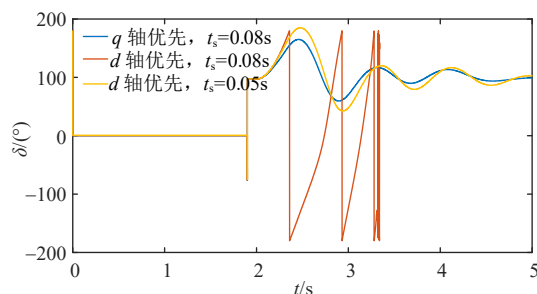
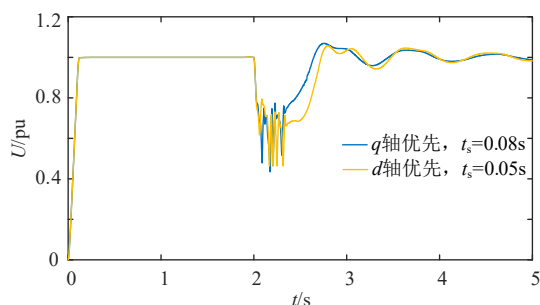


图 6 XJH 火电机组并网点母线电压

Fig. 6 Bus voltage of grid-connected point of XJH thermal power unit



(a) 西北电网发电机组最大功角差



(b) 最大功角差对应机组并网点电压监测结果

图 7 限流控制策略对稳定性的影响

Fig. 7 Influence of current limiting control strategy on stability

采用不同限流控制策略的结果。

图 7(a)为西北电网构网型机组采用不同控制策略时系统最大功角差的监测结果。由图可知,当故障持续时间 $t_s=0.08\text{s}$ 时,系统构网型机组采用 q 轴优先限流控制策略的稳定性明显高于采用 d 轴优先限流控制策略的稳定性,前者在故障清除后其功角曲线逐渐趋于稳定,而後者的功角曲线直接失稳。降低故障持续时间以提高系统稳定性,当 $t_s=0.05\text{s}$ 时,构网型机组采用 d 轴优先限流控制策略,系统也能稳定运行。比较如图 7(b)所示功角稳定时系统最大功角差对应机组并网点电压,可以看出,构网型机组采用 q 轴优先限流控制策略时的电压支撑能力明显高于 d 轴优先时的电压支撑能力。

在大电网下,距故障距离越近的构网型机组越容易被限流,故障远端的机组基本不会进入限流状态。总体而言,相比于改变常规机组加减速面积进而影响系统稳定性,构网型机组限流后更容易降低系统电压支撑能力,导致系统稳定性降低,并且限流机组越多系统稳定性越差。

2.3 构网型机组控制参数影响

与传统同步机组的阻尼和惯量为固有参数不同,构网型机组阻尼、惯量等参数灵活可控,合理控制构网型机组阻尼和惯量参数能有效提高同步稳定性。一般而言,构网型机组阻尼越大越有利于同步稳定,这是因为增大构网型机组阻尼不仅可以减小机组的加速面积,同时也会增大其减速面积,显

著改善了机组稳定性。而构网机组惯量的变化对稳定性的影响则会根据机组位置和调节时间有所不同。临界群机组和余下群机组惯量变化对稳定性影响相反,故障加速期间和故障后减速期间惯量变化对稳定性影响相反。图 8 为临界群和余下群惯量变化对系统功角稳定性的影响。

由图 8(a)可以看出,临界群构网型机组惯量越大,系统最大功角差摆动越小,系统稳定性越好。而余下群机组惯量变化则会呈现相反的结果,如图 8(b)所示,当余下群的构网型机组惯量发生相同的变化时,惯量越大,系统功角差摆动越大。

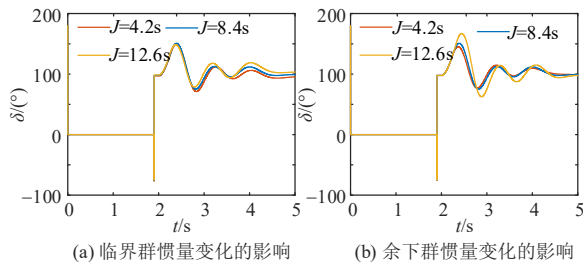


图 8 惯量对功角的影响

Fig. 8 Influence of inertia on power angle

分析式(8)所示的转子运动方程可以看出,机组惯量越大功角变化速度越慢。故障期间功角变化速度越慢,加速面积越小,故障清除后,功角变化速度越快,减速面积越大,越有利于同步稳定。

$$\begin{cases} J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \\ \frac{d\delta}{dt} = \Delta \omega \end{cases} \quad (8)$$

图 9 所示为在不同时间调节临界群构网型机组惯量对系统稳定性的影响。由图 9(a)、(b)可以看出,故障期间惯量越大,系统最大功角差的摆动幅度越低,系统稳定性越好;由图 9(c)、(d)可以看出,故障清除后当临界群机组惯性时间常数为 8.4s 时,系

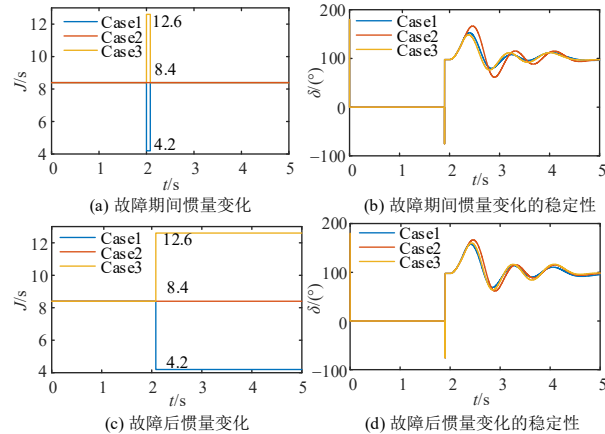


图 9 惯量变化对系统功角稳定性的影响

Fig. 9 Effect of inertia adjustment time on power angle stability

统稳定性最差,临界群机组惯性时间常数为 12.6s 时次之,惯量时间常数为 4.2s 时稳定性最好,整体而言仍然是惯量越低稳定性越好。

实际上,根据故障类型、故障位置等的不同,仿真结果可能存在一定差异,但跟网型和构网型机组对系统暂态稳定的影响规律并不会发生很大的变化。以上针对 XHM-GDH 发生 N-1 故障的分析结果已具备较高的参考价值,由于篇幅有限,其他运行场景的分析与计算不再赘述。

3 新能源占比的影响

3.1 跟网型机组占比对大电网稳定问题的影响

在暂态过程中,系统电气量功角与电压之间存在交互耦合影响,当系统发生功角稳定问题时,发电机功角摆开会导致部分母线电压下降,系统失稳后,影响扩大可能使得大范围电压降低^[49-50],此时,系统暂态稳定形态可能会更加复杂。随着新能源机组占比不断提升,上述问题可能会愈加明显,尤其是当新能源机组占比到达一定程度后,系统电压支撑能力大幅降低,仅依靠跟网型机组将难以保障电网稳定运行,需要合理配置构网型机组。为此,本文通过常规机组与新能源机组等量置换的方式,设置了新能源不同占比的运行场景,如表 1 所示。

表 1 不同新能源占比的运行场景
Table 1 Operation scenarios of different proportions of new energy sources

运行 场景	常规机组/ MW	新能源机组/ MW	新能源占比/%	
			跟网型	构网型
C1	12177	3044	20	0
C2	10655	4566	30	0
C3	9133	6088	40	0
C4	7610.5	7610.5	50	0

当西北电网在 XHM-GDH 的输电通道发生 N-1 故障时,不同跟网型机组不同占比下系统最大功角差和 XHM 母线电压的监测结果如图 10 所示。由图 10(a)可知,稳态下随着新能源占比的不断提升,系统最大功角差逐渐增大,分别为 69.43°、89.46°、110.04°、118.37°。比较此时 XHM 母线电

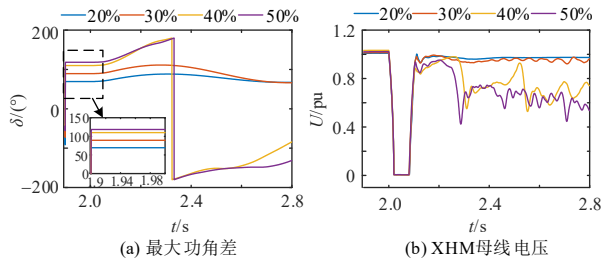


图 10 跟网型机组占比对系统的影响

Fig. 10 Influence of different proportion of grid-following new energy units on system stability

压可以看出,其电压支撑能力为:20%>30%>40%>50%。这是因为随着新能源占比的不断提升,常规发电机组与系统间的等值电抗也会逐渐增大,继而稳态的功角会增大,并且在新能源占比达到40%后,系统已发生功角失稳。

3.2 构网型机组占比对大电网稳定问题的影响

由3.1节可知,C3场景即新能源占比为40%时,西北电网已经不能稳定运行,该场景下各区域电网750kV母线电压如附录图A6所示。可以看到,区域Q、G母线电压变化最严重,其次是区域X,最后是区域N、S。这说明当系统新能源占比达到一定程度后,系统稳定形态不再是简单的功角失稳或电压失稳,而呈现出功角失稳和电压失稳交织的复杂失稳形态,如何判别此时的主导失稳模式还需要进行深入分析研究,本文暂不做深入讨论。

为提高电压支撑能力,同时兼顾运行经济性,本文将3.1节中新能源占比为40%的场景中的部分跟网型机组替换为构网型机组。其中构网型机组的配置情况见表2,表中 P 表示构网型机组的出力,下标“DH”等表示接入站点位置,以 P_{DH} 为例, $P_{DH}=100$ 表示接入GDH的构网型机组出力为100MW。

表2 构网型机组配置情况						
Table 2 Configuration of grid-forming new energy units						
场景	区域 G/ MW	区域 X/ MW	区域 Q/ MW	构网型 占比/%	跟网型 占比/%	新能源 占比/%
C31	$P_{DH}=100, P_{HM}=200,$ $P_{MG}=300 P_{ST}=201$		$P_{YK}=150,$ $P_{CD}=300$	8	32	40
C32	$P_{DH}=100, P_{HM}=200,$ $P_{MG}=300 P_{ST}=201$			5	35	40
C33			$P_{YK}=150,$ $P_{CD}=300$	3	37	40
C34	$P_{DH}=100$	$P_{HM}=200$	$P_{YK}=150,$ $P_{CD}=300$	5	35	40

图11为构网型机组不同配置下系统的稳定性。显然构网型机组的占比越大系统电压支撑能力越强,功角越稳定。比较场景C32—C34发现,QYK、QCD是提高系统稳定水平的关键节点,即构网型机组最佳安装位置。对于C3场景,构网型机组的最佳配置方案为C34,此时仅需要5%的构网型机组

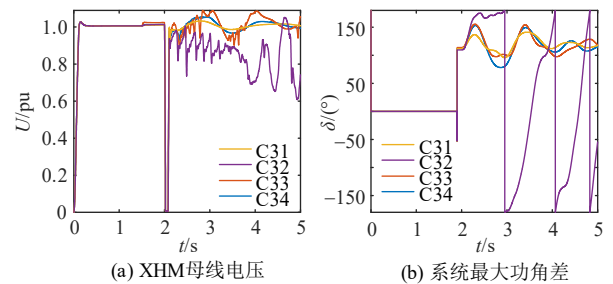


图 11 构网型机组不同配置下的稳定性
Fig. 11 Stability of different configurations of grid-forming new energy units

就能保障系统安全稳定运行。

采用同样的方法分析3.1节中的C4场景,由于篇幅限制不再赘述,最后得到构网型机组最佳配置方案为: $P_{DH1}=100\text{MW}$ 、 $P_{DH2}=367.9\text{MW}$ 、 $P_{YK}=150\text{MW}$ 、 $P_{CD}=300\text{MW}$,此时构网型机组的占比仅为9%。由附录表A1还可以看出,当新能源总占比增加到60.4%时,构网型机组占比为26.6%。这说明随着新能源占比的提升,构网型机组的占比也会增加。

综上所述,随着新能源占比的提升,系统稳定性及其稳定形态都会发生变化。当跟网型机组占比到达一定程度后,系统会因电压支撑能力大幅减弱而失去稳定,此时需要配置一定的构网型机组才能维持系统的安全稳定运行。而构网型机组接入位置和接入容量的优化配置,在提升系统电压支撑能力、保证系统同步稳定运行的同时,也能有效保证系统运行经济性。

4 结论

本文针对目前对高比例新能源接入电网后系统暂态稳定特性和演化形态认知不足的问题,以实际西北电网构建模拟场景,探讨了高比例新能源接入大电网后的暂态稳定特性,主要结论如下:

1) 在稳定形态方面,跟网型机组以能量注入的形式间接影响系统同步机组的暂态稳定特性,在浅度故障下对系统暂态稳定特性的影响有限。构网型机组限流前的同步稳定性特性与常规机组无异,限流后其稳定特性会受到限流控制策略和限流阈值的影响。在本文分析场景中,故障类型相同时, q 轴优先的控制策略具有更高的稳定裕度,其极限切除时间至少比 d 轴优先的控制策略长0.03s;在 q 轴优先的限流控制策略下,当限流阈值降低25%时,系统最大功角差会增大10.57°,这说明在保证构网型机组安全的前提下,可以尽可能地增大限流阈值以提高其稳定性。

2) 采用虚拟同步控制的构网型机组其虚拟惯量参数灵活可控,对改善系统暂态稳定特性具有重要作用。故障加速期间增大临界群机组惯量有利于系统稳定,故障清除后减速期间减小临界群机组惯量有利于系统稳定,且故障期间惯量参数调节效果更优,这需要较为精确的实时广域控制技术。

3) 随着跟网型机组的占比逐渐提升,系统暂态稳定性会逐渐降低,并呈现出功角失稳和电压失稳交织的复杂失稳形态。在本文的分析场景中,当跟网型机组占比达到40%时系统就已失去稳定,需

要合理配置构网型机组才能维持系统稳定。而构网型机组并非越多越好,其容量配置受构网型机组安装位置的影响,新能源占比越大需要的构网型机组也越多。

在本文的研究基础上,下一步研究工作包括:

1) 将研究问题拓展到多类暂态稳定问题及其对新能源机组的交互影响,如直流闭锁、换相失败等故障下的暂态过电压问题等;2) 深入研究构网型机组优化配置和大电网广域协调控制等。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 辛保安,陈梅,赵鹏,等.碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J].中国电机工程学报,2022,42(19): 6919-6930.
XIN Bao'an, CHEN Mei, ZHAO Peng, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6930(in Chinese).
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [3] 孙华东,徐式蕴,许涛,等.电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J].中国电机工程学报,2022,42(21): 7796-7808.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7808(in Chinese).
- [4] 鲍颜红,张金龙,衣立东,等.含大规模风电电力系统的安全稳定风险预防控制方法[J].电力系统自动化,2022,46(13): 187-194.
BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, YI Lidong, et al. Prevention and control method of security and stability risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 187-194(in Chinese).
- [5] 葛平娟,涂春鸣,肖凡,等.面向暂态稳定性提升的VSG参数灵活控制策略[J].中国电机工程学报,2022,42(6): 2109-2123.
GE Pingjuan, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Transient stability enhancement of a VSG based on flexible switching of control parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2109-2123(in Chinese).
- [6] 严干贵,岳霖,张皓程,等.风电外送电力系统暂态稳定性分析及提升策略[J].电网技术,2024,48(12): 4826-4832.
YAN Gangui, YUE Lin, ZHANG Haocheng, et al. Transient stability analysis and enhancement strategy of wind power sending power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4826-4832(in Chinese).
- [7] HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3220-3229.
- [8] 汤蕾,沈沉,张雪敏.大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一):理论基础[J].中国电机工程学报,2015,35(15): 3832-3842.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems-part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3832-3842(in Chinese).
- [9] 汤蕾,沈沉,张雪敏.大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二):影响因素分析[J].中国电机工程学报,2015,35(16): 4043-4051.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin, et al. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems-part II: factors affecting transient angle stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051(in Chinese).
- [10] 郑超,孙华东.功角稳定支路暂态输电能力与扩展等面积准则方法之关联评析与互补应用[J].电网技术,2024,48(12): 4844-4854.
ZHENG Chao, SUN Huadong. Association analysis and complementary application of BTTC and EEAC method for rotor angle stability[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4844-4854(in Chinese).
- [11] 郭小江,赵丽莉,汤奕,等.风火打捆交直流外送系统功角暂态稳定研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22): 19-25.
GUO Xiaojiang, ZHAO Lili, TANG Yi, et al. Study on angle transient stability for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 19-25(in Chinese).
- [12] 毛安家,马静,蒯圣宇,等.高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J].中国电机工程学报,2020,40(9): 2745-2755.
MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2755(in Chinese).
- [13] 张明理,徐建源,李佳珏.含高渗透率风电的送端系统电网暂态稳定研究[J].电网技术,2013,37(3): 740-745.
ZHANG Mingli, XU Jianyuan, LI Jiajue. Research on transient stability of sending power grid containing high proportion of wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 740-745(in Chinese).
- [14] 徐式蕴,李宗翰,赵兵,等.新型电力系统标准算例(一):功角稳定 CSEE-RAS[J].中国电机工程学报,2024,44(15): 5973-5984.
XU Shiyun, LI Zonghan, ZHAO Bing, et al. Benchmark for AC-DC hybrid system with high penetration of renewables (I): rotor angle stability CSEE-RAS[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5973-5984(in Chinese).
- [15] MATEVOSYAN J, BADRZADEH B, PREVOST T, et al. Grid-forming inverters: are they the key for high renewable penetration?[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89-98.
- [16] 杨银国,袁泉添,陆秋瑜,等.考虑切换动态的功率同步控制单台构网型换流器暂态稳定性分析[J].电网技术,2023,47(10): 4005-4016.
YANG Yinguo, YUAN Xiaotian, LU Qiuyu, et al. Transient stability analysis of grid-forming converter with power synchronization control considering switching dynamics[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4005-4016(in Chinese).
- [17] ROSSO R, WANG Xiongfei, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [18] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control

- strategy, stability, application, and challenges[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [19] 李明飞, 吴在军, 全相军, 等. 计及阻尼特性的构网型并网逆变器暂态同步稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(15): 198-207. LI Mingfei, WU Zaijun, QUAN Xiangjun, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming grid-connected inverter considering damping characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(15): 198-207(in Chinese).
- [20] CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [21] NDREKO M, RÜBERG S, WINTER W. Grid forming control scheme for power systems with up to 100% power electronic interfaced generation: a case study on Great Britain test system[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(8): 1268-1281.
- [22] CHOOPANI M, HOSSEINIAN S H, VAHIDI B. New transient stability and LVRT improvement of multi-VSG grids using the frequency of the center of inertia[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 527-538.
- [23] 张毅. 新能源成西北地区主体电源[N]. *经济日报*, 2024-01-01(003).
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [25] ALBERTO L F C, BRETAS N G. Synchronism versus stability in power systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 1999, 21(4): 261-267.
- [26] DÖRFLER F, BULLO F. Synchronization and transient stability in power networks and nonuniform Kuramoto oscillators[J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2012, 50(3): 1616-1642.
- [27] XIN Huanhai, ZHANG Leiqi, WANG Zhen, et al. Control of island AC microgrids using a fully distributed approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 943-945.
- [28] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. *高电压技术*, 2022, 48(9): 3367-3383. GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(9): 3367-3383(in Chinese).
- [29] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(9): 3-9. XU Zheng. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 3-9(in Chinese).
- [30] 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): 1687-1701. 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): 1687-1701(in Chinese).
- [31] 程成, 谢少军, 谭玲娟, 等. 跟网型逆变器的非线性模型及稳定性分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(6): 137-143. CHENG Cheng, XIE Shaojun, TAN Lingjuan, et al. Nonlinear model and stability analysis method for grid-following inverter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(6): 137-143(in Chinese).
- [32] 唐王倩云, 张睿, 胡家兵. 用于系统暂态行为分析的双馈风机转子转速控制时间尺度暂态模型[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(9): 3037-3045. TANG Wangqianyun, ZHANG Rui, HU Jiabing. Modelling of DFIG-based WT for power system transient responses analysis in rotor speed control timescale[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(9): 3037-3045(in Chinese).
- [33] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18): 5457-5467. HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18): 5457-5467(in Chinese).
- [34] 于珍, 沈沉, 张雪敏. 双馈风机故障穿越后功率恢复速率对系统暂态稳定的影响分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(13): 3781-3791. YU Zhen, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Analysis on the impact of post-fault power recovery speed of doubly-fed induction generators on power system transient stability[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(13): 3781-3791(in Chinese).
- [35] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [36] 冯雷, 蔡泽祥, 王奕, 等. 双馈风电机组低压穿越特性对电力系统暂态稳定的影响[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(3): 16-23. FENG Lei, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Impact of DFIG LVRT characteristics on transient stability of power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(3): 16-23(in Chinese).
- [37] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 双馈风电机组故障行为及对电力系统暂态稳定性的影响[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(10): 16-21. TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Performances of DFIG-based wind turbines during system fault and its impacts on transient stability of power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(10): 16-21(in Chinese).
- [38] 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(in Chinese).
- [39] ARGHIR C, DÖRFLER F. The electronic realization of synchronous machines: model matching, angle tracking, and energy shaping techniques[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4398-4410.
- [40] 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): 2339-2358. 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): 2339-2358(in Chinese).
- [41] 唐王倩云, 周保荣, 胡家兵, 等. 锁相同步型风机-同步机互联电力系统转子转速尺度暂态同步稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(20): 6900-6915. TANG Wangqianyun, ZHOU Baorong, HU Jiabing, et al. Transient synchronous stability of PLL-based wind power-synchronous generation interconnected power system in rotor speed control timescale[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(20): 6900-6915(in Chinese).
- [42] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [43] 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(in Chinese).
- [44] ROKROK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1519-1531.
- [45] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [46] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2815-2824.
- FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2815-2824(in Chinese).
- [47] TAUL M G, WANG Xiongfei, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1062-1073.
- [48] LIU Teng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. A current limiting method for single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters during symmetrical faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4751-4763.
- [49] 郑超, 孙华东, 张爱军, 等. 基于广域支路响应的功角与电压主导稳定模式判别及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6148-6159.
- ZHENG Chao, SUN Huadong, ZHANG Aijun, et al. Discrimination of rotor angle stability and voltage stability based on wide-area branch response and emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6148-6159(in Chinese).
- [50] 赵兵, 吴萍, 蒋彦翊, 等. 响应驱动的新型电力系统暂态稳定判别方法综述[J]. 电网技术, 2025, 49(7): 2633-2648.
- ZHAO Bing, WU Ping, JIANG Yanhong, et al. A survey on response-driven transient stability determination of new generation of power system[J]. Power System Technology, 2025, 49(7): 2633-2648.



喻梦洁

在线出版日期: 2024-09-30。

收稿日期: 2024-07-09。

作者简介:

喻梦洁(1998), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为新能源并网安全稳定分析与控制技术, E-mail: yumengjie@sgepri.sgcc.com.cn;

鲍颜红(1971), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源并网安全稳定分析与控制技术等, E-mail: baoyanhong@sgepri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 邱丽萍 马晓华)

附录 A

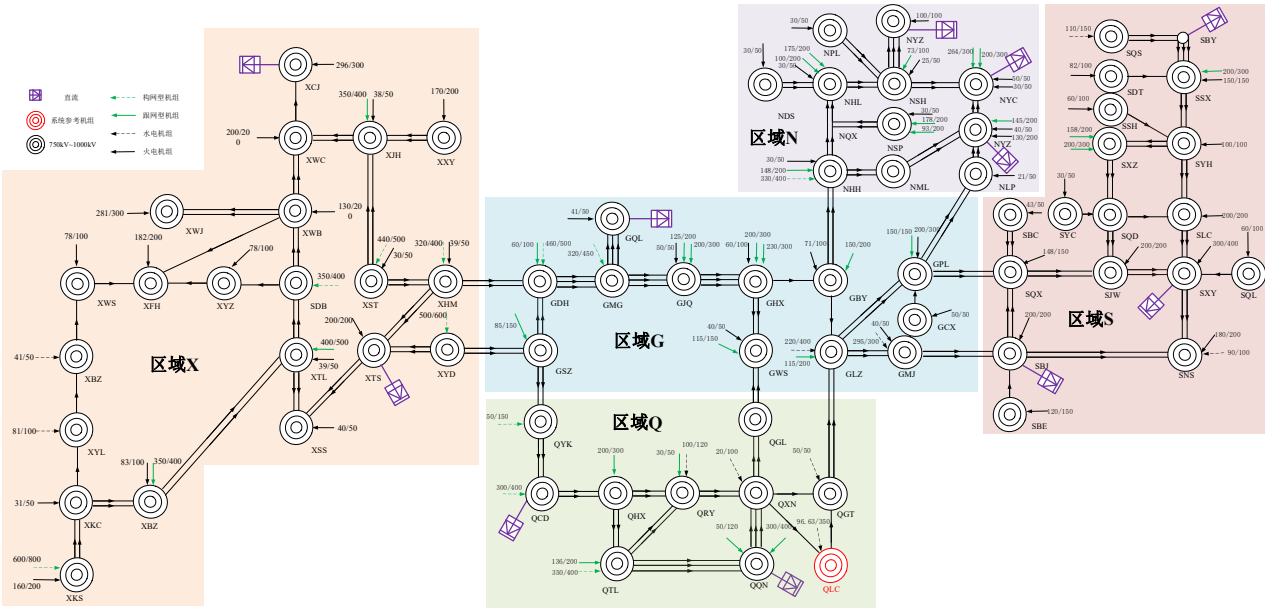


图 A1 西北电网 750kV 系统架构

Fig. A1 System architecture of 750kV northwest power grid

表 A1 西北区域电网机组出力

Table A1 Unit output of northwest regional grid

区域	常规机组出力/MW		新能源机组出力/MW	
	水电	火电	跟网型	构网型
区域 G	515	462	1310	780
区域 X	122	2075	1100	2210
区域 N	0	546	1376	330
区域 S	200	1873	550	0
区域 Q	196.63	0	780	700

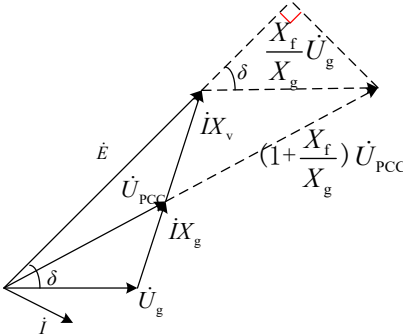


图 A2 构网型机组电压电流相位

Fig. A2 Voltage and current phase diagram of grid-forming new energy units

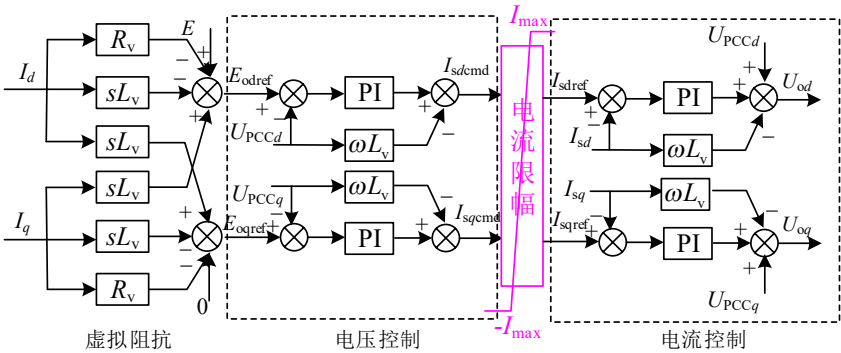


图 A3 构网型机组电压电流内环控制框图

Fig. A3 Block diagram of voltage-current inner-loop control for grid-forming new energy units

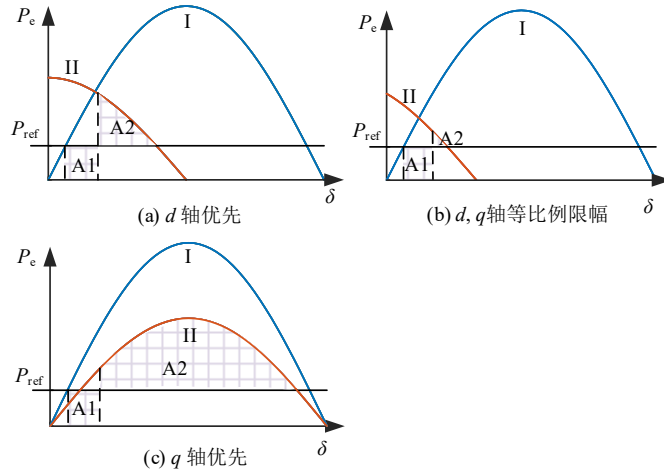


图 A4 不同限流策略的功角曲线

Fig. A4 Power angle curve of different current limiting strategies

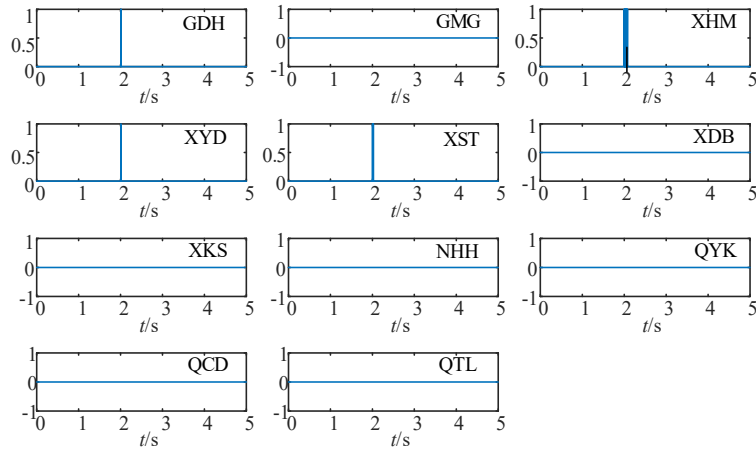


图 A5 构网型机组限流模块动作情况

Fig. A5 Operation of current limiting module for grid-forming new energy units

表 A2 构网型机组限流模块动作情况

Table A2 Operation of current limiting module for grid-connected new energy units

$I_{\max}$	GDH	GMG	XHM	XYD	XST	XDB
1.5	√	×	√	√	√	×
2.0	×	×	√	×	×	×
3.0	×	×	×	×	×	×
$I_{\max}$	XKS	NHH	QYK	QCD	QTL	
1.5	×	×	×	×	×	
2.0	×	×	×	×	×	
3.0	×	×	×	×	×	

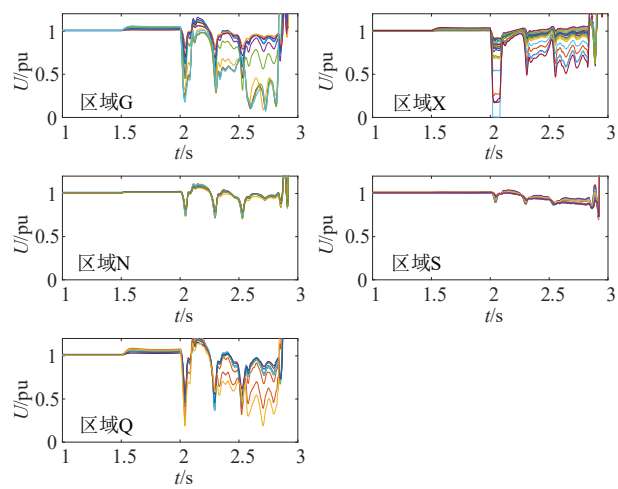


图 A6 C3 场景的母线电压
Fig. A6 Bus voltage of scenario C3