

跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与 振荡机理分析

雷雨, 李光辉, 王伟胜, 何国庆, 郭梓暄

(可再生能源并网全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Comparison of Impedance Characteristics and Oscillation Mechanism for Grid Following and Grid Forming Renewable Energy

LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, HE Guoqing, GUO Zixuan

(National Key Laboratory of Renewable Energy Grid-integration (China Electric Power Research Institute),

Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Under the goal of “carbon peak and carbon neutrality”, renewables such as wind power and photovoltaic, using power electronic converters as grid-connected interfaces, are developing rapidly. Grid-following (GFL) and grid-forming (GFM), as the two mainstream control methods of power electronic converters, have attracted widespread attention for their stability when connected to the grid. Existing studies have compared the differences in impedance characteristics and oscillation risk between GFM and GFL based on the impedance model and Nyquist stability criterion. However, since GFM and GFL have multiple control loops, the difference of their characteristics in different frequency bands and their dominant factors are still unclear, especially the role and function of the synchronization loop. In addition, the mechanism of GFM connected to the grid in improving the stability of GFL remains to be analyzed. In this paper, the impedance characteristics of GFL and GFM in different frequency bands are compared and analyzed, the role and function of synchronization loop in the impedance characteristics are clarified, and the dominant factors that determine the difference between the impedance characteristics of GFL and GFM are revealed. Then, the three-port model of GFL and GFM connected to the grid is also established, and the mechanism of GFM connected to the grid in improving the stability of GFL is analyzed. Based on the control hardware-in-the-loop simulation platform, the GFL and GFM grid-connection experiments are carried out to verify the correctness of the analysis in this paper.

KEY WORDS: renewable energy; grid-following; grid-forming;

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202255377A-2-0-ZN)。
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China
(5100-202255377A-2-0-ZN).

synchronization control; impedance characteristics; broadband oscillation

摘要: “双碳”战略下, 以电力电子变换器为并网接口的风电、光伏等新能源发展迅速。跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)作为电力电子变换器的两种控制方式, 其并网宽频振荡问题引起了广泛关注。现有研究基于阻抗模型和Nyquist稳定判据对比GFM和GFL阻抗特性差异与振荡风险。由于GFM和GFL具有多控制回路, 且二者在不同频段阻抗特性差异来源和主导因素仍未明确, 特别是同步环节在其中的角色和作用亟需深入研究。此外, GFM并网实现GFL并网宽频振荡抑制的作用机理仍有待分析。该文首先对GFL和GFM不同频段阻抗特性进行对比, 定量分析同步环节在阻抗特性中的角色和作用, 揭示了决定二者不同频段阻抗特性差异的主导因素; 然后, 建立GFL和GFM并网的三端口稳定性判据, 分析GFM并网实现GFL并网宽频振荡抑制的作用机理; 最后, 基于控制硬件在环仿真平台, 开展GFL和GFM并网实验, 验证该文分析的正确性。

关键词: 新能源; 跟网型; 构网型; 同步环节; 阻抗特性; 宽频振荡

0 引言

近二十年来, 我国以风电、光伏为代表的新能源发电快速发展。截至2022年底, 新能源装机7.58亿kW, 占全国发电总装机的29.56%, 已成为我国第二大电源^[1-2]。为实现碳达峰、碳中和, 保障能源供应安全, 未来我国将在沙漠、戈壁、荒漠地区加快建设大型风电和光伏基地, 同时大力推进海上风电基地建设^[3]。

目前，新能源并网控制主要以跟网型(grid-following, GFL)为主。GFL 通过锁相环(phase lock loop, PLL)跟随电网电压实现同步，采用电流矢量控制并网电流，对外呈现“电流源”特性。GFL 以其简单控制结构、成熟 PLL 技术及其在最大功率点工作的特性被广泛应用于风电、光伏并网控制^[4]。由于 GFL 通过 PLL 跟随电网电压，需要交流系统提供同步电压。随着 GFL 大规模并网，局部地区电网强度变弱，GFL 与弱电网间的交互作用导致宽频振荡事故频繁发生，对电力系统的安全、稳定运行带来严峻挑战^[5-8]。

随着未来“沙戈荒”风电、光伏大基地的开发，局部地区将形成以弱、无同步机支撑的电网，需要将部分新能源控制为构网型(grid-forming, GFM)以支撑系统电压与频率^[9-14]。GFM 通过功率同步控制实现与电网同步，采用电压幅值、频率控制方式实现交流电压控制，对外呈现“电压源”特性。GFM 不依赖于外部电网而自行构建系统所需电压，既可独立运行也可在弱网条件下运行^[15-16]。基于以上优势，GFM 近年来在学术界和工业界得到了广泛关注和应用，国内外学者对 GFM 的并网问题开展了广泛研究。

近年来，阻抗分析法逐渐成为分析与抑制新能源并网宽频振荡的一种有效方法。针对 GFL 和 GFM 并网宽频振荡问题，国内外学者采用阻抗分析法展开了大量研究。文献[17]对 GFM 进行了阻抗建模，对比分析了 GFL 和 GFM 的阻抗特性差异，发现 GFM 阻抗幅值远小于 GFL，相位呈感性，在弱网下具有更好的稳定性；文献[18]进一步建立了电流控制型和电压控制型 GFM 阻抗模型，发现电压控制型 GFM 比电流控制型 GFM 更适合应用于新能源并网发电；文献[19]在对 GFM 阻抗建模的基础上，重点分析功率外环的二倍镜像耦合效应及功率外环参数的影响，提出虚拟阻抗的方法提高系统鲁棒稳定性；文献[20-21]对采用 GFL 和 GFM 控制双馈风机的阻抗特性进行对比，发现电压源型双馈风机在弱网下具有较好适应能力，以及良好的控制参数适配特性。

综上所述，现有文献基于阻抗分析法从不同角度研究了 GFL 和 GFM 阻抗特性，发现 GFM 在弱网场景下具有更好的稳定性。然而，已有文献仅从 GFL 和 GFM 负阻尼阻抗特性角度出发，结合 Nyquist 稳定判据对比了二者稳定性。一方面，由

于 GFL 和 GFM 具有多控制回路，其不同频段阻抗特性差异来源和主导因素尚未明确，特别是同步环节在其中的角色和作用有待深入研究；另一方面，接入 GFM 对于改善 GFL 并网宽频振荡的作用机理尚不清晰。因而定位 GFM 在弱网场景下阻抗特性优势来源，提取决定 GFM 和 GFL 并网稳定性的主导因素对于新能源并网控制优化、提升新能源并网稳定性尤为关键。

本文对 GFL 和 GFM 不同频段阻抗特性差异及其主导因素进行对比分析。首先，基于小信号在 GFL 和 GFM 中的传递关系，建立 GFL 和 GFM 的阻抗模型，对二者阻抗特性进行对比分析，阐明同步环节在阻抗特性中的角色和作用，揭示决定阻抗特性差异的主导因素；然后，建立 GFL 和 GFM 并网的三端口稳定性判据，分析 GFM 并网实现 GFL 并网宽频振荡抑制的作用机理；最后，基于控制硬件在环仿真平台，开展 GFL 和 GFM 接入电网实验，验证本文分析的正确性。

1 跟网型/构网型阻抗模型

本节首先基于 GFL/GFM 典型控制结构，构建 GFL/GFM 小信号传递关系函数，分析了由 GFL/GFM 不同控制结构引入的差异。在此基础上建立 GFL/GFM 的阻抗模型，为后续二者阻抗特性对比奠定基础。

1.1 典型控制结构

GFL 通过 PLL 与电网同步，分别控制 i_d 和 i_q ，对外呈现“电流源”或“功率源”特性；GFM 通过一阶下垂控制或二阶 VSG 控制与交流电网同步，直接控制输出电压的幅值与频率(相角)，对外呈现“电压源”特性。GFL 和 GFM 在控制结构上的差异主要体现在同步方式与控制目标两个方面。

GFL/GFM 典型控制结构如图 1 所示，其中： v_a 、 v_b 、 v_c 分别为并网点三相电压； i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相输出电流； e_a 、 e_b 、 e_c 为三相调制信号； v_d 、 v_q 分别为并网点 dq 轴电压； i_d 、 i_q 分别为 dq 轴输出电流； V_{ref} 为输出电压参考值； i_{dref} 、 i_{qref} 为 dq 轴输出电流参考值； θ_{PLL} 、 θ_{droop} 、 θ_{VSG} 分别为 PLL，一阶下垂控制，二阶 VSG 控制输出相角。

为了定量对比 GFL 和 GFM 阻抗特性，将二者共有的结构及参数统一，并基于如下前提条件展开：

- 1) GFL/GFM 主电路采用相同拓扑结构和参数；
- 2) GFL/GFM 共有控制环节采用相同控制参数；

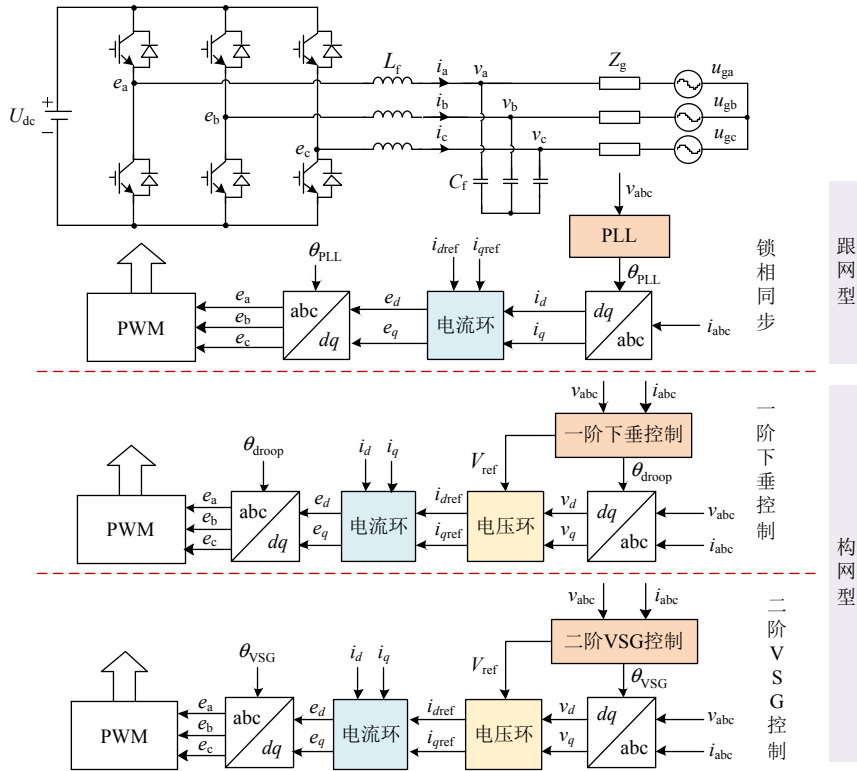


图1 GFL/GFM 典型控制结构

Fig. 1 Typical structure of GFL/GFM

3) 将直流侧等效为理想直流源;

4) GFL/GFM 并网短路比相同。

1.2 小信号传递关系

对于 GFM, 在交流电压稳态工作点上叠加一个频率为 f_p 的正序电压小信号 \hat{v}_a , 小信号在 GFM 内部传递关系如图 2(a)所示。根据线性电路叠加定理, 电流响应小信号 \hat{i}_a 等于忽略有功环动态时产生的电流小信号 \hat{i}_{a1} 与由有功环动态引入的电流小信号 \hat{i}_{a2} 之和。

忽略有功环动态时, 电压小信号 \hat{v}_a 经理想 Park 变换(忽略 PLL 动态)、电压电流双闭环控制以及脉宽调制(pulse width modulation, PWM)在交流端口输出电流小信号 \hat{i}_{a1} , 其中, 电压小信号 \hat{v}_a 到电流小信号 \hat{i}_{a1} 的传递关系用 $\Lambda_2\Lambda_1$ 表示。

电压小信号 \hat{v}_a 和电流小信号 \hat{i}_{a1} 将带来有功功率小信号 \hat{P}_e , 其中, 电压小信号 \hat{v}_a 到有功率小信号 \hat{P}_e 的传递关系用 P_v 表示, 电流小信号 \hat{i}_{a1} 到直流侧功率小信号 \hat{P}_e 的传递关系用 P_i 表示。进一步, 功率小信号 \hat{P}_e 通过一阶下垂控制或二阶 VSG 控制产生同步角小信号 $\hat{\theta}$, 其中, 功率小信号 \hat{P}_e 到同步角小信号 $\hat{\theta}$ 的传递关系用 $H_p(s)$ 表示。同步角小信号 $\hat{\theta}$ 经坐标变换环节、电压电流双环控制以及 PWM

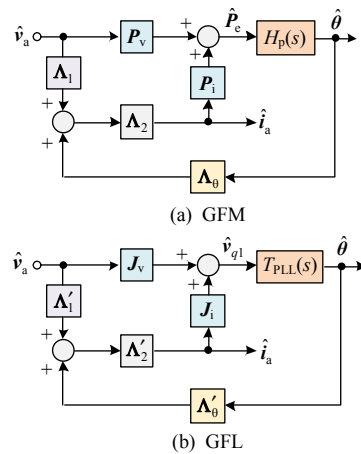


图2 GFL/GFM 小信号传递关系

Fig. 2 Small-signal relationship of GFL/GFM

调制带来附加的电流小信号 \hat{i}_{a2} , 其中, 同步角小信号 $\hat{\theta}$ 到电流小信号 \hat{i}_{a2} 的传递关系用 $\Lambda_2\Lambda_0$ 表示。由电流小信号 \hat{i}_{a2} 产生的功率小信号将进一步影响有功环动态过程, 再经坐标变换、电压电流双环控制和 PWM 调制反馈回电流响应。

对于 GFL, 在交流电压稳态工作点上叠加一个频率为 f_p 的正序电压小信号 \hat{v}_a , 小信号在 GFL 内部传递关系如图 2(b)所示。同样, 根据线性电路叠加定理, 电流响应小信号 \hat{i}_a 等于忽略 PLL 动态时产生的电流小信号 \hat{i}_{a1} 与由 PLL 动态引入的电流小信

号 \hat{i}_{a2} 之和。

忽略 PLL 动态时, 电压小信号 \hat{v}_a 经电流控制以及 PWM 调制在交流端口输出电流小信号 \hat{i}_{a1} , 其中, 电压小信号 \hat{v}_a 到电流小信号 \hat{i}_{a1} 的传递关系用 $\Lambda'_2\Lambda'_1$ 表示。

电压小信号 \hat{v}_a 经理想 Park 变换得到 q 轴电压小信号 \hat{v}_{q1} , 其中, 电压小信号 \hat{v}_a 到 q 轴电压小信号 \hat{v}_{q1} 的传递关系用 J_v 表示, 电流小信号 \hat{i}_a 到 q 轴电压小信号 \hat{v}_{q1} 的传递关系用 J_i 表示。进一步, q 轴电压小信号 \hat{v}_{q1} 通过 PLL 闭环控制产生同步角小信号 $\hat{\theta}$, 其中, q 轴电压小信号 \hat{v}_{q1} 到同步角小信号 $\hat{\theta}$ 的传递关系用 $T_{PLL}(s)$ 表示。同步角小信号 $\hat{\theta}$ 再经坐标变换环节、电流双环控制以及 PWM 调制引入附加的电流小信号 \hat{i}_{a2} , 其中, 同步角小信号 $\hat{\theta}$ 到电流小信号 \hat{i}_{a2} 的传递关系用 $\Lambda'_2\Lambda'_0$ 表示。

1.3 阻抗建模

根据 1.2 节图 2, 可得 GFM 和 GFL 交流端口导纳表达式如式(1)、(2)所示。

$$Y_{GFM} = -\Lambda_2(\Lambda_1 + \frac{\Lambda_0 H_p(s)(P_v + P_i \Lambda_2 \Lambda_1)}{I - \Lambda_0 H_p(s) P_i \Lambda_2}) + Y_{Cf} \quad (1)$$

$$Y_{GFL} = -\Lambda'_2(\Lambda'_1 + \frac{\Lambda'_0 T_{PLL}(s)(J_v + J_i \Lambda'_2 \Lambda'_1)}{I - \Lambda'_0 T_{PLL}(s) J_i \Lambda'_2}) + Y_{Cf} \quad (2)$$

式中: Y_{GFM} 和 Y_{GFL} 分别为 GFM 型和 GFL 交流端口导纳, 是由其正序导纳 Y_{GFM}^{pp} 、 Y_{GFL}^{pp} , 负序导纳 Y_{GFM}^{nn} 、 Y_{GFL}^{nn} 以及耦合导纳 Y_{GFM}^{pn} 、 Y_{GFM}^{np} 、 Y_{GFL}^{pn} 、 Y_{GFL}^{np} 构成的 2×2 阶矩阵; Y_{Cf} 为滤波电容矩阵。为消除机网-耦合效应, 下文均采用考虑机-网耦合后的正序阻抗 Z_{GFM}^p 、 Z_{GFL}^p 进行分析。

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{GFM}^p = Y_{GFM}^{pp} - \frac{Y_{GFM}^{pn} Y_{GFM}^{np}}{Y_g^n + Y_{GFM}^{nn}} \\ Y_{GFM}^n = Y_{GFM}^{nn} - \frac{Y_{GFM}^{pn} Y_{GFM}^{np}}{Y_g^p + Y_{GFM}^{pp}} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} Y_{GFL}^p = Y_{GFL}^{pp} - \frac{Y_{GFL}^{pn} Y_{GFL}^{np}}{Y_g^n + Y_{GFL}^{nn}} \\ Y_{GFL}^n = Y_{GFL}^{nn} - \frac{Y_{GFL}^{pn} Y_{GFL}^{np}}{Y_g^p + Y_{GFL}^{pp}} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{GFM}^p = 1 / Y_{GFM}^p \\ Z_{GFM}^n = 1 / Y_{GFM}^n \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} Z_{GFL}^p = 1 / Y_{GFL}^p \\ Z_{GFL}^n = 1 / Y_{GFL}^n \end{array} \right. \quad (4)$$

阻抗模型中表征小信号传递关系的各系数表达式可详见附录, 下文对 GFL/GFM 阻抗模型各系数进行对比说明。

1) 系数 Λ_1 和 Λ_2 。

对于 GFM, $\Lambda_2\Lambda_1$ 表征其在忽略有功环动态时电压小信号 \hat{v}_a 到电流小信号 \hat{i}_{a1} 的传递关系, 表达式

详见附录。其中, Λ_1 与电压环电流环乘积 $H_v(s)H_i(s)$ 直接相关, Λ_2 主要与电流环 $H_i(s)$ 有关;

对于 GFL, $\Lambda'_2\Lambda'_1$ 表征其在忽略 PLL 动态时电压小信号 \hat{v}_a 到电流小信号 \hat{i}_{a1} 的传递关系, 表达式详见附录。其中, $\Lambda'_1 = -I$; Λ'_2 仅与电流环 $H_i(s)$ 有关。

2) 系数 P_v 、 P_i 和 J_v 、 J_i 。

对于 GFM, P_v 、 P_i 分别表示电压小信号 \hat{v}_a 和电流小信号 \hat{i}_a 到功率小信号 \hat{P}_e 的传递关系, 表达式详见附录。二者仅与稳态工作点有关;

对于 GFL, J_v 、 J_i 分别表示电压小信号 \hat{v}_a 和电流小信号 \hat{i}_a 到 q 轴理想电压小信号 \hat{v}_{q1} 的传递关系, 表达式详见附录。值得注意的是, $J_i=0$, J_v 仅与稳态工作点有关。

3) 系数 $H_p(s)$ 和 $T_{PLL}(s)$ 。

对于 GFM, $H_p(s)$ 表征其功率小信号 \hat{P}_e 到同步角小信号 $\hat{\theta}$ 的传递关系。其中, 一阶下垂控制表达式为

$$H_p(s) = -\frac{K_\omega}{s} \cdot 2\pi \quad (5)$$

二阶 VSG 控制环节表达式为

$$H_p(s) = -\left(\frac{1}{Js + D_p}\right) \cdot \frac{2\pi}{s} \quad (6)$$

式中: K_p 为一阶下垂控制的下垂系数, 由电网标准决定; J 为二阶 VSG 控制的惯性时间常数; D_p 为二阶 VSG 控制的阻尼系数。

对于 GFL, $T_{PLL}(s)$ 表征 q 轴电压小信号 \hat{v}_{q1} 到同步角小信号 $\hat{\theta}$ 的传递关系, 为 PLL 的闭环传函, 表达式如下:

$$T_{PLL}(s) = \frac{H_{PLL}(s)}{1 + V_1 H_{PLL}(s)} \quad (7)$$

式中: $H_{PLL}(s) = (K_{pp} + K_{ip}/s)/s$; K_{pp} 和 K_{ip} 分别为 PLL 的比例积分系数。

4) 系数 Λ_0 。

对于 GFM, $\Lambda_2\Lambda_0$ 表征同步角小信号 $\hat{\theta}$ 到电流小信号 \hat{i}_{a2} 的传递关系, 表达式详见附录。 Λ_0 主要与电压环 $H_v(s)$ 和电流环 $H_i(s)$ 有关。

对于 GFL, $\Lambda'_2\Lambda'_0$ 同样表征同步角小信号 $\hat{\theta}$ 到电流小信号 \hat{i}_{a2} 的传递关系, 表达式详见附录。 Λ'_0 仅与电流环有关。

1.4 模型校验

为验证上述 GFL/GFM 阻抗解析模型准确性, 搭建了 MATLAB/Simulink 仿真模型, 采用扰动注

入的阻抗扫描方法进行验证, GFL/GFM 系统主电路参数如表 1 所示。

表 1 GFL/GFM 主电路参数

序号	物理量	符号	取值
1	额定容量/MW	S_n	1.5
2	额定电压/V	V_{nom}	563
3	额定频率/Hz	f_l	50
4	滤波电感/mH	L_f	0.1
5	滤波电容/mF	C_f	0.5
6	直流母线额定电压/V	V_{dc}	1190

基于频率扫描得到的阻抗测量值和基于式(1)、(2)数值计算得到的阻抗解析值的对比结果如图 3 所示, 图 3(a)中 GFM 正、负序阻抗 Z_{GFM}^p 、 Z_{GFM}^n 解

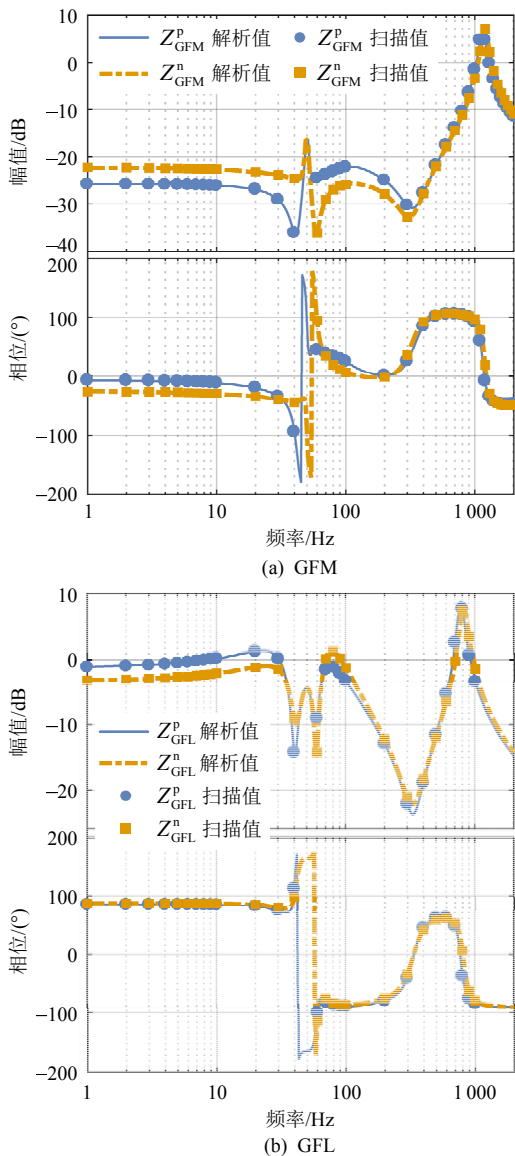


图 3 GFL/GFM 阻抗解析模型验证

Fig. 3 Verification of analytical impedance model of GFL/GFM

析值分别用蓝色和黄色实线表示, 其测量结果分别用蓝色和黄色离散点表示。图 3(b)中 GFL 正、负序阻抗 Z_{GFL}^p 、 Z_{GFL}^n 解析值分别用蓝色和黄色实线表示, 其测量结果分别用蓝色和黄色离散点表示。对比结果表明, 解析模型与扫描结果吻合良好, 验证了所建立的解析阻抗模型的准确性。

2 跟网型/构网型阻抗特性对比分析

基于上文建立的 GFL/GFM 阻抗解析模型, 本节将其阻抗特性进行对比, 定量揭示 GFL/GFM 阻抗幅值和相位特性差异产生原因, 并分析不同同步方式对阻抗特性的影响。

2.1 阻抗特性对比

基于一阶下垂控制、二阶 VSG 同步的 GFM 与基于 PLL 同步的 GFL 阻抗特性曲线对比如图 4 所示。由图可知, 从阻抗幅值特性来看, 中低频段阻抗特性主要受各个控制器和工作点影响, GFL 在中低频段的阻抗幅值显著高于 GFM; 高频段阻抗特性主要受滤波器影响, GFL 和 GFM 在高频阻抗幅值差异减小。从阻抗相位特性来看, GFL 在中高频段呈容性(相位 $<0^\circ$); GFM 在中高频段呈感性(相位 $>0^\circ$)。上述阻抗幅值和相位特性的差异是 GFM 区别于 GFL 的重要特征。

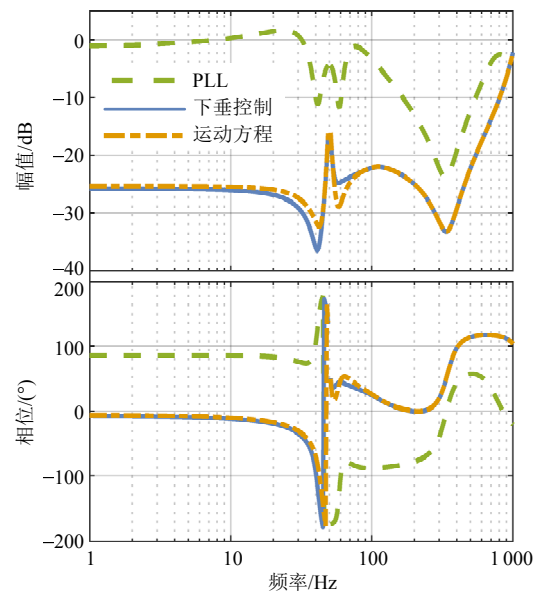


图 4 GFL/GFM 阻抗特性对比曲线

Fig. 4 Comparison of GFL/GFM impedance characteristics

此外, 对于 GFM 而言, 一阶下垂控制和二阶 VSG 不同同步方式对其阻抗特性的影响主要体现在 50 Hz 附近。

下文结合 1.2 节的解析模型定量分析 GFL/GFM

阻抗幅值和相位特性差异产生原因以及同步环节在阻抗特性中的角色和影响。

2.2 阻抗解析模型分解

1.2 节所示的 GFL/GFM 小信号传递关系可变换为图 5 所示形式。图中：支路 1 表示忽略同步环节动态时电压小信号 \hat{v}_a 到电流小信号 \hat{i}_{a1} 的传递关系；支路 2 表示由同步环节动态带来的电流小信号响应 \hat{i}_{a2} 。

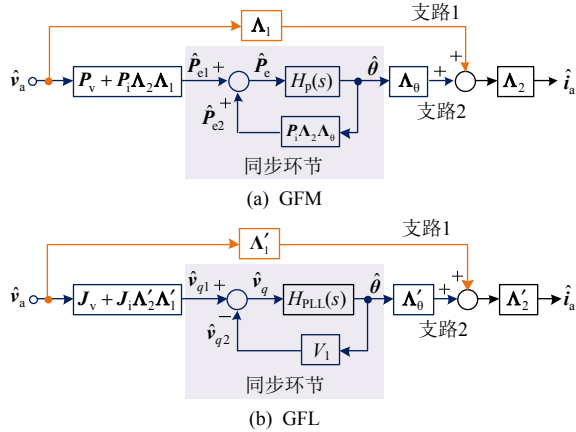


图 5 GFL/GFM 小信号传递关系简化图

Fig. 5 Modified small-signal relationship of GFL/GFM

对于 GFM，端口电压扰动 \hat{v}_a 和忽略同步角 θ 动态时产生的 \hat{i}_{a1} 作用产生功率小信号 \hat{P}_{e1} 、 \hat{P}_{e1} 经同步环节产生同步角小信号 $\hat{\theta}_1$ 、 $\hat{\theta}_1$ 再经坐标变换、电压电流双环控制以及 PWM 调制引入附加电流小信号 \hat{i}_{a2} 、 \hat{i}_{a2} 与 \hat{v}_a 作用进而又将反馈产生功率小信号 \hat{P}_{e2} 叠加至原有功率小信号上，直至功率达到动态平衡。此闭环动态过程可由图 5(a) 所示的紫色矩形框部分表示。

对于 GFL，端口电压扰动 \hat{v}_a 经理想坐标变换 (忽略同步角 θ 动态) 产生 q 轴电压小信号 \hat{v}_{q1} 、 \hat{v}_{q1} 经 PLL 控制器产生同步角小信号 $\hat{\theta}_1$ ，再通过坐标变换进一步反馈产生 q 轴电压 \hat{v}_{q2} 叠加至原有 q 轴电压小信号上，直至 q 轴电压达到动态平衡。此闭环动态过程可由图 5(b) 所示的紫色矩形框部分表示。

因此，可将 GFL/GFM 阻抗拆分为两部分：一部分由电压环或电流环 (支路 1) 所决定；另一部分由同步环节 (支路 2) 所决定。两部分阻抗呈并联关系。表达式如下：

$$\begin{cases} Y_{GFM1} = -\Lambda_2 \Lambda_1 + Y_{Cf} \\ Y_{GFM2} = \frac{-\Lambda_2 \Lambda_0 H_p(s) (P_v + P_i \Lambda_2 \Lambda_1)}{I - \Lambda_0 H_p(s) P_i \Lambda_2} \\ Y_{GFM} = Y_{GFM1} + Y_{GFM2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Y_{GFL1} = -\Lambda'_2 \Lambda'_1 + Y_{Cf} \\ Y_{GFL2} = \frac{-\Lambda'_2 \Lambda'_0 T_{PLL}(s) (J_v + J_i \Lambda'_2 \Lambda'_1)}{I - \Lambda'_0 T_{PLL}(s) J_i \Lambda'_2} \\ Y_{GFL} = Y_{GFL1} + Y_{GFL2} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 阻抗影响因素分析

本节基于 2.2 节模型分别对同步环节、电压电流环对 GFL/GFM 阻抗特性差异的影响做定量分析。

2.3.1 同步环节影响分析

首先根据图 5 紫色矩形框所示的同步环节传递函数，对 GFL/GFM 同步环节的闭环特性进行对比分析。对于 GFM，其同步环节闭环传递函数 $T_p(s)$ 如下：

$$T_p(s) = \frac{H_p(s) I}{I - H_p(s) P_i \Lambda_2 \Lambda_0} \quad (10)$$

对于 GFL，其同步环节闭环传递函数 $T_{PLL}(s)$ 如下：

$$T_{PLL}(s) = \frac{H_{PLL}(s) I}{1 + V_1 H_{PLL}(s)} \quad (11)$$

GFL/GFM 同步环节的闭环特性对比如图 6 所示。

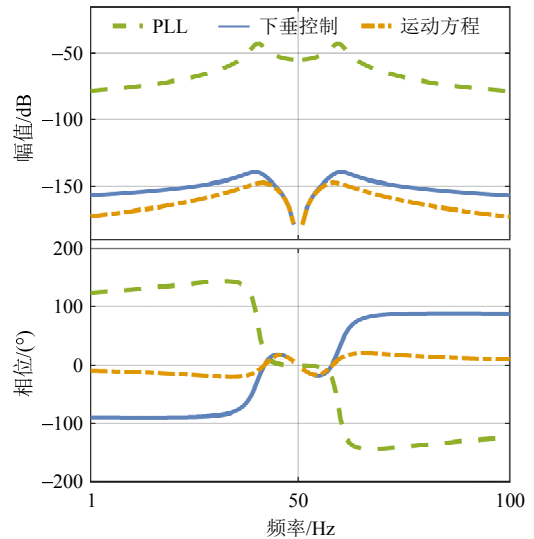


图 6 不同同步环节特性对比

Fig. 6 Comparison of different synchronization loop

由图 6 可知，由于控制信号存在 $abc-dq$ 坐标变换，闭环传递函数 $T_p(s)$ 、 $T_{PLL}(s)$ 在解析模型中体现为 $T_p(s-j\omega_1)$ 、 $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ ， $\omega_1=2\pi f_1$ ， f_1 为额定频率。

从幅值特性上来看，PLL、一阶下垂控制和二阶 VSG 的闭环传递函数幅值均关于 $f=f_1$ 对称，且在其附近出现 2 个对称的谐振峰，谐振峰对应频率为 $f_1 \pm f_{tc}$ ， f_{tc} 与同步环节带宽直接相关。可以发现， $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ 幅值明显高于一阶下垂控制和二阶 VSG

对应的闭环传函 $T_p(s-j\omega_1)$ 幅值，主要是由于 $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ 反映的是 q 轴电压到同步角的传递关系而 $T_p(s-j\omega_1)$ 反映的是功率到同步角的传递关系， $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ 和 $T_p(s-j\omega_1)$ 幅值差近似等于电流的大小。此外， $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ 和 $T_p(s-j\omega_1)$ 主要在频段 (f_1-f_{ic}, f_1+f_{ic}) 内起作用，对阻抗特性产生影响。

从相位特性上来看， $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ 和 $T_p(s-j\omega_1)$ 相位均关于 $f=f_1$ 中心对称，且 $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ 和 $T_p(s-j\omega_1)$ 相位趋势相反。结合图 4， $T_{PLL}(s-j\omega_1)$ 导致 GFL 在 (f_1-f_{ic}, f_1+f_{ic}) 频段的阻抗特性出现负阻尼， $T_p(s-j\omega_1)$ 导致 GFM 在 (f_1-f_{ic}, f_1+f_{ic}) 频段的阻抗特性相位出现凹陷。

在此基础上，分析同步环节对阻抗特性的影响。基于 PLL、一阶下垂控制和二阶 VSG 同步的逆变器阻抗分别用 Z_{PLL}^p 、 Z_{droop}^p 、 Z_{VSG}^p 表示。下标“1”表示由支路 1 产生的阻抗，下标“2”表示由支路 2 产生的阻抗，逆变器总阻抗相当于二者的并联。不同同步环节对阻抗特性的影响如图 7 所示。由图可知，在频段 $f < f_1 - f_{ic}$ 和频段 $f > f_1 + f_{ic}$ 范围内，由支路 2 产生的阻抗幅值远高于支路 1，阻抗特性由支路 1 主导；在频段 $(f_1 - f_{ic}, f_1 + f_{ic})$ 范围内，支路 2 和支路 1 产生的阻抗幅值相接近，阻抗特性由支路 1 和支路 2 阻抗的并联决定。可看出同步环节主要在频段 $(f_1 - f_{ic}, f_1 + f_{ic})$ 对阻抗特性产生影响。

对于图 7(a)所示的基于 PLL 同步的 GFL，在频段 $(f_1 - f_{ic}, f_1 + f_{ic})$ 内，由于支路 1 产生的阻抗幅值远高于支路 2，阻抗特性主要由 PLL 主导的支路 2 决定。PLL 的闭环特性使得阻抗幅值在 $f_1 \pm f_{ic}$ 处对应出现两个谐振峰，相位出现负阻尼。

对于图 7(b)和(c)所示的基于下垂控制或二阶 VSG 同步的 GFM，在频段 $(f_1 - f_{ic}, f_1 + f_{ic})$ 内，支路 1

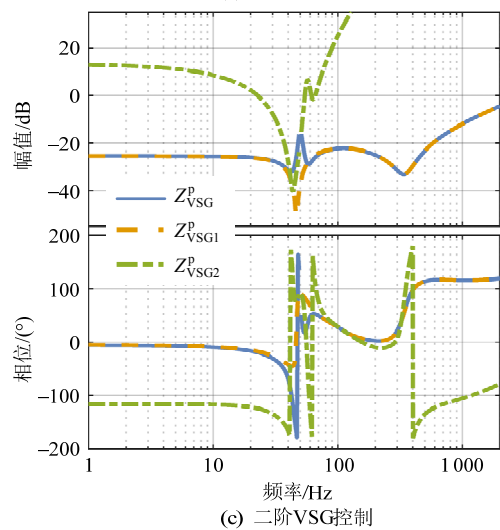
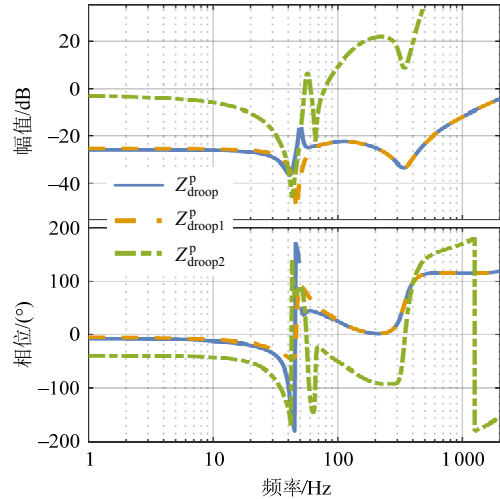
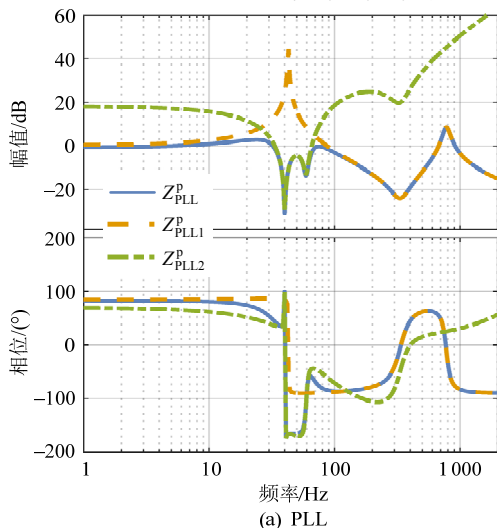


图 7 不同同步环节对阻抗特性的影响
Fig. 7 Influence of different synchronization loop on impedance characteristics

和支路 2 产生的阻抗幅值相接近，阻抗特性由二者并联共同决定。由一阶下垂控制或二阶 VSG 主导的支路 2 叠加后，使得阻抗幅值出现两个谐振峰，阻抗特性相位在次同步频段谐振峰对应频率处出现容性负阻尼，在超同步频段谐振峰对应频率处出现一个“凹陷”。一阶下垂控制和二阶 VSG 同步方式的不同主要影响容性负阻尼范围和相位凹陷程度。

2.3.2 电压环与电流环影响分析

根据 2.3.1 节的分析，由同步环节主导的支路 2 仅在频段 $(f_1 - f_{ic}, f_1 + f_{ic})$ 对逆变器的阻抗特性起叠加影响作用，GFL/GFM 阻抗特性在全频段的整体趋势主要由支路 1 决定。对于基于一阶下垂控制和二阶 VSG 同步的电压源型逆而言，仅在支路 2 有区别，支路 1 是一致的。下文以二阶 VSG 为例，对 GFL/GFM 阻抗特性进行对比分析。

GFL/GFM 支路 1 所反映的阻抗特性对比如图 8 所示。对于 GFL，支路 1 所反映的阻抗表达式为

$$Z_{PLL1} = (-\Lambda_2' \Lambda_1' + Y_{Cf})^{-1} \quad (12)$$

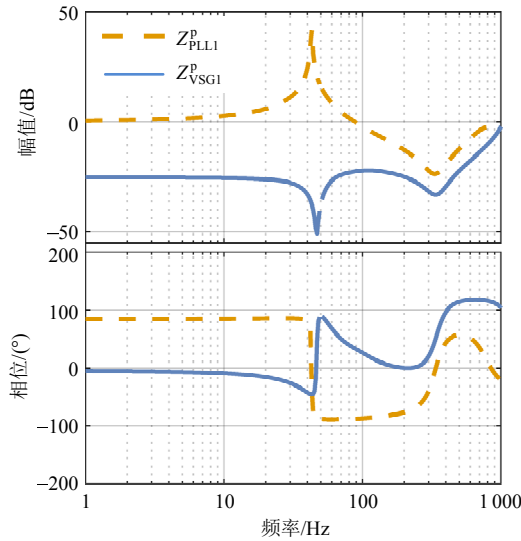


图 8 GFL/GFM 支路 1 阻抗特性对比

Fig. 8 Comparison of branch 1 of GFL/GFM

对于 GFM，支路 1 所反映的阻抗表达式为

$$Z_{VSG1} = (-\Lambda_2 \Lambda_1 + Y_{Cf})^{-1} \quad (13)$$

根据 1.3 节， Λ_2 和 Λ_2' 主要与电流环相关，由于 GFL 和 GFM 电流环控制参数一致， Λ_2 和 Λ_2' 区别较小。 Z_{VSG1} 和 Z_{PLL1} 的主要区别在于 Λ_1 和 Λ_1' ，而 Λ_1' 等价于将电压环置零时的 Λ_1 。

由于 GFM 电压外环的存在， $|\Lambda_1| \gg |\Lambda_1'|$ ，在阻抗幅值上表现为 GFM 阻抗幅值明显小于 GFL。此外，随着频率的增大，电压环的作用减弱，电流环和 LC 电路的特性越来越明显，二者阻抗幅值特性越来越接近。从电路原理上来看，GFM 具有较小的阻抗、GFL 具有较大的阻抗也更利于稳定。

同时，由图 8 可知，从相位特性上来看，GFM 在超同步频段呈感性，而在次同步频段呈容性；GFL 在超同步频段呈容性而在次同步频段呈感性。这是由于 abc-dq 坐标变换，输入到电压环和电流环的小信号频率为 $f_p - f_1$ ，当 $f_p < f_1$ 时，电压环表现为容性，电流环表现为感性，而 $f_p > f_1$ 时，电压环表现为感性，电流环表现为容性。相比于 GFL，GFM 电压外环作用叠加后，使得超同步频段相位往上抬而次同步频段相位往下降，与 GFL 呈现相反的特性。

综上所述，可得到如下结论：

1) GFL、GFM 阻抗解析模型均可分解为两部分，一部分是由同步环节(下垂/VSG/PLL)所主导的阻抗，另一部分是由其他控制环节(电压环/电流环)

所主导的阻抗，总阻抗由两部分阻抗并联构成。

2) GFM 阻抗幅值整体趋势显著低于 GFL，阻抗相位在中高频段呈感性而 GFL 阻抗相位在中高频段呈容性，其主要因素是 GFM 引入了交流电压环。

3) 同步环节仅对其频段内的阻抗特性起叠加影响作用：PLL 使得 GFL 在其带宽内出现负阻尼；功率同步控制使得 GFM 阻抗相位在次同步频段带宽处出现容性负阻尼，在超同步频段带宽处出现向下“凹陷”。

4) GFM 一阶下垂控制和二阶 VSG 同步方式主要影响容性负阻尼范围和相位凹陷程度。

3 跟网型/构网型并网系统宽频振荡分析

本节首先建立 GFL/GFM 新能源场站单独并网与 GFL、GFM 混合场站并网的三端口稳定性判据，然后分析 GFM 新能源场站并网对于改善 GFL 新能源场站并网系统宽频振荡的作用机理。

3.1 稳定性判据

GFL/GFM 新能源场站单独并网系统等值模型如图 9 所示。将 GFM 型新能源场站等值为电压源 V_s 与阻抗 Z_{GFM} 串联，将 GFL 型新能源场站等值为电流源 I_c 与阻抗 Z_{GFL} 并联， V_g 和 Z_g 分别为电网电压和电网阻抗，输出电流表达式见式(14)。对于 GFM 新能源场站，在输出空载电压稳定的既定条件下，其并网稳定的充要条件为 Z_{GFM}/Z_g 满足 Nyquist 判据；对于 GFL 新能源场站，在理想电网稳定运行的既定条件下，其并网稳定的充要条件为 Z_g/Z_{GFL} 满足 Nyquist 判据。

$$\begin{cases} I_{vout} = \frac{V_s - V_g}{Z_g} \cdot \frac{1}{1 + Z_{GFM}/Z_g} \\ I_{cout} = (I_c - \frac{V_g}{Z_{GFL}}) \cdot \frac{1}{1 + Z_g/Z_{GFL}} \end{cases} \quad (14)$$

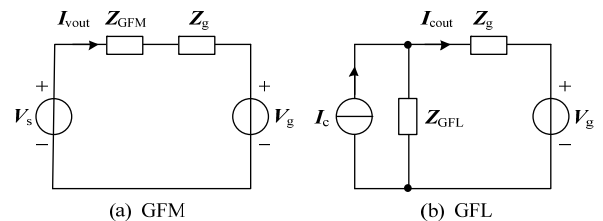


图 9 GFL/GFM 新能源场站单独并网系统等值模型

Fig. 9 Equivalent model of GFL/GFM renewable generation plants connected to the grid

GFL、GFM 新能源混合场站并网系统等效为由 GFL、GFM 新能源场站和电网构成的三端口网络，系统稳定性由三者共同决定，其等值模型如

图 10 所示。图中, I_{out} 为 GFL 型新能源场站输出电流; I_s 为 GFM 型新能源场站输出电流; I_g 为新能源场站输出到电网的电流。

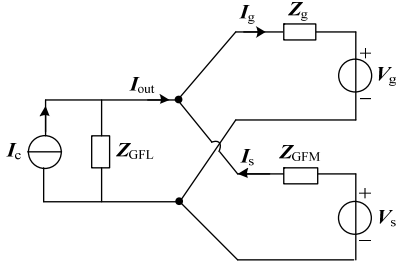


图 10 GFL、GFM 新能源混合场站并网系统等值模型
Fig. 10 Equivalent model of GFM and GFL hybrid plants connected to the grid

根据图 10, GFL 型新能源场站输出电流 I_{out} 表达式如下:

$$I_{out} = \left(I_c - \frac{V_{sys}}{Z_{GFL}} \right) \cdot \frac{1}{1 + Z_{sys}/Z_{GFL}} \quad (15)$$

V_{sys} 和 Z_{sys} 表达式分别为

$$\begin{cases} V_{sys} = V_s + \frac{1}{1 + Z_g/Z_{GFM}} (V_g - V_s) \\ Z_{sys} = Z_{GFM} // Z_g \end{cases} \quad (16)$$

式(15)中, 等式右边可视为两个闭环传递函数相乘, 将其分别记为

$$\begin{cases} T_{F1} = I_c - \frac{V_{sys}}{Z_{GFL}} \\ T_{F2} = \frac{1}{1 + Z_{sys}/Z_{GFL}} \end{cases} \quad (17)$$

GFL、GFM 型新能源经交流送出系统稳定性由 T_{F1} 和 T_{F2} 共同决定: 当且仅当 T_{F1} 和 T_{F2} 极点均位于左半平面时, 系统稳定。对于 T_{F1} , 以理想电网下 GFL 型新能源场站稳定运行既定条件, I_c 、 $1/Z_{GFL}$ 所有极点均位于左半平面, T_{F1} 稳定性取决于 V_{sys} 。根据式(16), V_{sys} 为 GFL 型新能源场站并网点开路电压, 即 GFM 型新能源场站单独并网时的并网点电压。当 GFM 型新能源场站单独并网稳定时, T_{F1} 所有极点均位于左半平面。对于 T_{F2} , 当开环传递函数 Z_{sys}/Z_{GFL} 满足 Nyquist 判据时, T_{F2} 所有极点均位于左半平面。

综上所述, 当且仅当 GFL、GFM 型新能源经交流送出系统同时满足以下条件时系统稳定:

- 1) GFL 新能源场站在理想电网下能稳定运行;
- 2) GFM 新能源场站单独并网时稳定;
- 3) 阻抗比 Z_{sys}/Z_{GFL} 满足 Nyquist 稳定性判据。

3.2 宽频振荡分析

本节首先进行 GFL/GFM 新能源场站单独并网宽频振荡分析, 然后基于三端口稳定性判据分析不同比例 GFM 新能源场站并网对于 GFL 并网系统宽频振荡的作用。

3.2.1 GFL/GFM 新能源场站单独并网

根据式(14), 当新能源场站阻抗在和电网阻抗幅值交点频率处存在负阻尼(相位 $< -90^\circ$)时有振荡风险。

由图 11 可知, GFL 和 GFM 分别接入较弱的电网(电网阻抗较大), 即当电网阻抗幅值曲线位于区域 A 时, 在 $|Z_g/Z_{GFL}| \geq 1$ 的频段 GFL 相位存在容性负阻尼, 将导致其 Nyquist 曲线包围 $(-1, 0)$, 有不稳定风险。而 GFM 在 $|Z_{GFM}/Z_g| \geq 1$ 的频段, 阻抗相位接近 0° , 不存在容性负阻尼, 其 Nyquist 曲线不会包围 $(-1, 0)$, GFM 能够稳定运行。相比于 GFL, GFM 阻抗特性在弱网环境下更为友好。

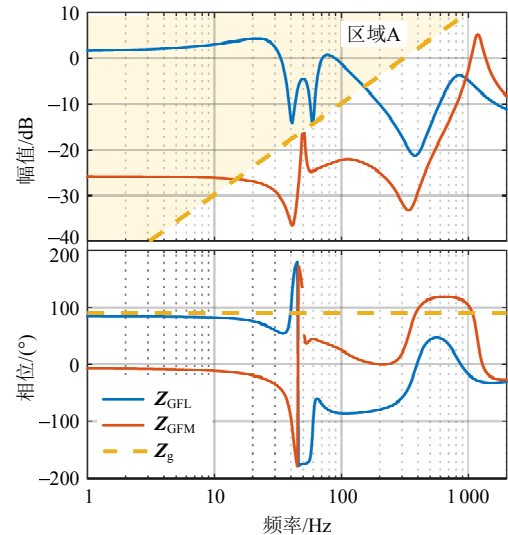


图 11 GFL、GFM 新能源场站单独并网阻抗图
Fig. 11 Impedance characteristics of GFM, GFL renewable plants connected to the grid

3.2.2 GFL、GFM 新能源混合场站并网

GFL、GFM 新能源混合场站并网稳定性可由式(15)所示的三端口网络稳定性判据判定。由于传统 GFL 新能源场站通常在电网较弱时振荡风险高, 本节主要在弱网环境下进行分析。因此, 在满足 3.1 节条件 1) 和条件 2) 的前提下, 可通过 $(Z_{GFM} // Z_g) / Z_{GFL}$ 是否满足 Nyquist 判据来分析三端口系统的稳定性。此时, 从 GFL 的角度看, 系统等效阻抗由电网阻抗 Z_g 变为 GFM 阻抗并联电网阻抗 $Z_{GFM} // Z_g$, $Z_{GFM} // Z_g$ 与 Z_{GFL} 幅值交点所对应的相角差在 180° 附近即不稳定。

不同比例的 GFL、GFM 新能源场站并网阻抗如图 12 所示。GFL 新能源并网容量一定，数量为 100 台，电网阻抗一定。接入不同容量的 GFM 新能源，台数分别为 0、20、50。图中： Z_g 为电网阻抗； Z_{eq} 为从 GFL 角度看的电网等效阻抗， $Z_{eq}=Z_{GFM} // Z_g$ ，当 GFM 接入为 0 时， $Z_{eq}=Z_g$ 。

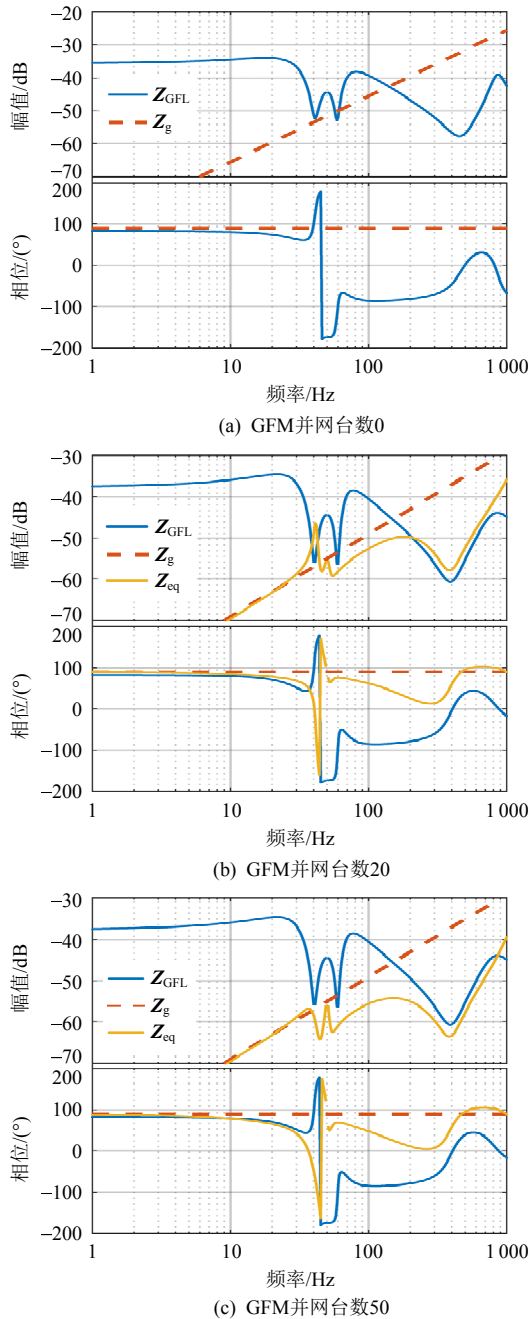


图 12 不同比例 GFL、GFM 新能源并网阻抗图
Fig. 12 Impedance of different ratios of GFM, GFL connected to the grid

由图 12 可知，接入不同容量的 GFM 改变了电网等效阻抗 Z_{eq} 在次、超同步频段及高频段的阻抗特性。随着 GFM 接入比例增大，电网等效阻抗 Z_{eq} 减小，幅值下移，相位更接近于 GFM 阻抗相位。

在超同步频段和高频段，由于并联后 Z_{eq} 幅值显著下降， Z_{eq} 与 Z_{GFL} 幅值交点右移或消失，且由于 Z_{eq} 相位小于 90° ， Z_{eq} 与 Z_{GFL} 相角差相比于 GFM 接入前减小，降低了新能源场站的振荡风险。

4 案例分析

本节基于控制硬件在环(control hardware-in-the-loop, CHIL)仿真平台，以不同比例 GFL、GFM 新能源场站接入交流弱电网为例，基于三端口 Nyquist 判据，时域仿真和频域分析相结合，进行 GFL、GFM 新能源场站接入电网宽频振荡分析。

4.1 平台介绍

本文基于 CHIL 仿真平台，搭建了不同比例 GFL、GFM 新能源场站接入交流弱电网的仿真模型，开展阻抗扫描和时域仿真验证。CHIL 实时仿真实验平台如图 13 所示，100 台容量为 1.5 MW GFL 新能源发电单元经 0.69 kV/35 kV 变压器升压后接入电压等级为 35 kV、短路比为 1.4 的交流弱电网。

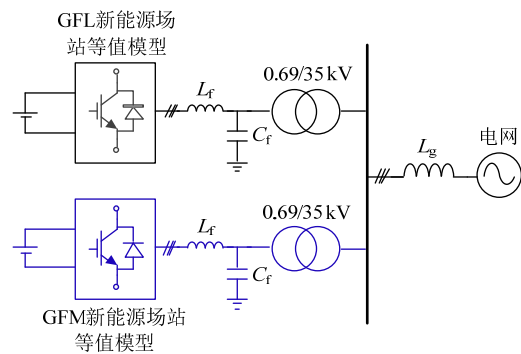


图 13 CHIL 实时仿真实验平台示意图

Fig. 13 Diagram of CHIL simulation experiment platform

保持电网阻抗不变，分别接入 0 和 50 台容量为 1.5 MW 的 GFM 新能源发电单元，仿真中采用单机倍乘的方式对新能源发电单元进行等值，控制器采用实际装置。GFL、GFM 新能源发电单元主电路参数和各控制器参数如表 1—3 所示。

表 2 GFL 新能源控制参数

Table 2 Control Parameters of GFL

序号	变量	符号	取值
1	PLL 参数	K_{pp}/K_{ip}	0.055 8/6.072 7
2	电流环参数	K_{pi}/K_{ii}	$4.840 7 \times 10^{-5}/0.364 9$

表 3 GFM 新能源控制参数

Table 3 Control Parameters of GFM

序号	变量	符号	取值
1	有功/无功下垂系数	K_p/K_q	$6.666 7 \times 10^{-7}/3.753 3 \times 10^{-5}$
2	电流环参数	K_{pi}/K_{ii}	$2.115 4 \times 10^{-4}/0.731 0$
3	电压环参数	K_{pv}/K_{iv}	$25.940 0/2.819 7 \times 10^3$

4.2 仿真实证

首先在短路比为 1.4 的条件下单独接入 100 台 GFL 新能源发电单元, CHIL 阻抗扫描结果和仿真波形分别如图 14、15 所示。由图可知, GFL 新能源场站阻抗与交流电网阻抗幅值在 120 Hz 处相交, 相位相差 180.39°, 系统发生振荡, 频率为 120 Hz。

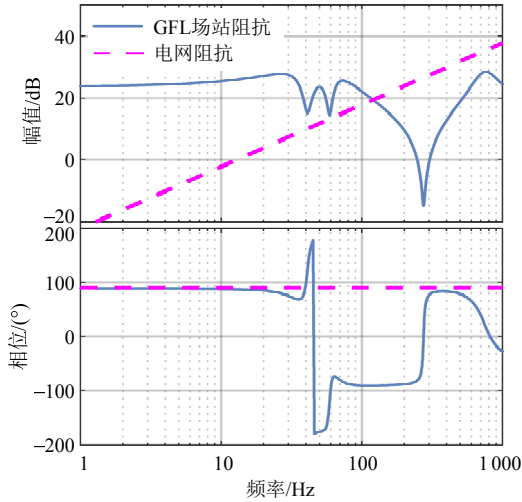


图 14 100 台 GFL 新能源接入交流电网阻抗特性

Fig. 14 Impedance characteristics of 100 GFL renewable generation units connected to the grid

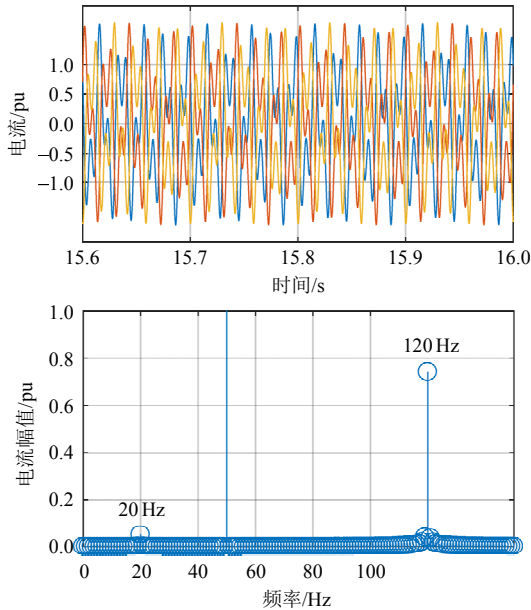


图 15 100 台 GFL 新能源接入交流电网仿真波形

Fig. 15 Simulation waveform of 100 GFL renewable generation units connected to the grid

保持电网阻抗不变, 单独接入 50 台 GFM 新能源发电单元时, CHIL 阻抗扫描结果和仿真波形分别如图 16、17 所示。由图可知, GFM 新能源场站阻抗与交流电网阻抗幅值在 34 Hz 处相交, 相位相差 132.81°, 系统稳定。满足 3.1 节稳定性判据中的条件 2)。

保持电网阻抗不变, 100 台 GFL 新能源发电单

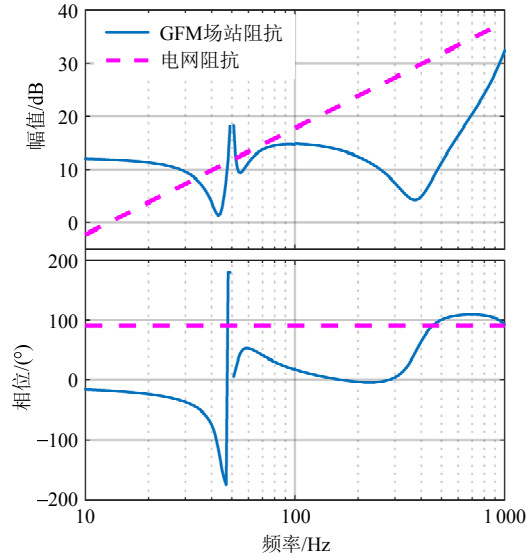


图 16 50 台 GFM 新能源接入交流电网阻抗特性

Fig. 16 Impedance characteristics of 50 GFM renewable generation units connected to the grid

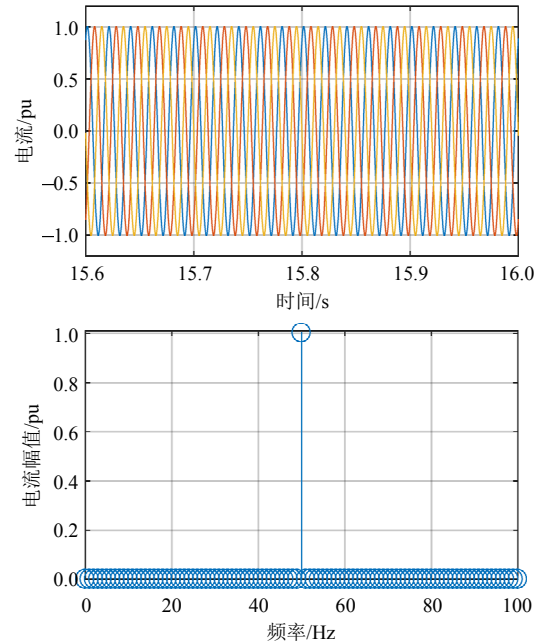


图 17 50 台 GFM 新能源接入交流电网仿真波形

Fig. 17 Simulation waveform of 50 GFM renewable generation units connected to the grid

元和 50 台 GFM 新能源发电单元同时接入交流电网, 根据前文分析, 稳定性判据中条件 1) 和条件 2) 均成立, 因此可通过条件 3) 判定系统稳定性。此时, GFL 新能源场站阻抗和接入 GFM 新能源场站后的电网等效阻抗 CHIL 扫描结果和仿真波形分别如图 18 和 19 所示。由图可知, GFL 新能源场站阻抗与 GFM 接入后的等效阻抗幅值在 171 Hz 处相交, 相位相差 109.01°, 系统不存在振荡风险。GFM 接入后使得 GFL 阻抗和电网等效阻抗交点右移, 且电网等效阻抗相位降低, 与 GFL 阻抗相位差缩小, 降低新能的振荡风险。

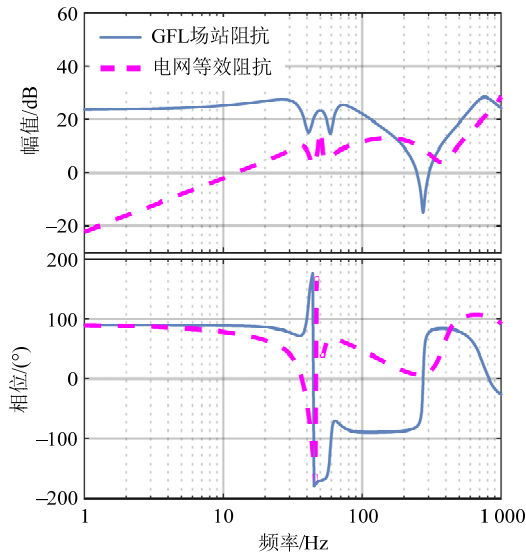


图 18 GFL、GFM 新能源接入交流电网阻抗特性

Fig. 18 Impedance characteristics of GFL and GFM renewable generation units connected to the grid

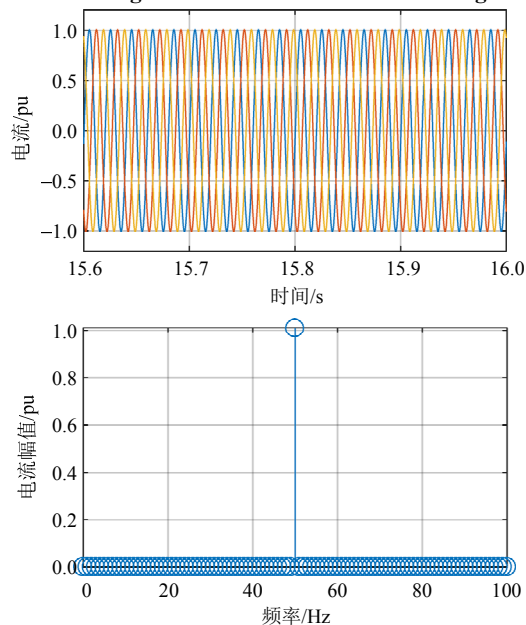


图 19 GFL、GFM 新能源接入交流电网仿真波形

Fig. 19 Simulation waveform of GFL and GFM renewable generation units connected to the grid

5 结论

本文基于小信号在 GFL 和 GFM 中的传递关系，建立了 GFL 和 GFM 的阻抗模型，对 GFL 和 GFM 阻抗特性进行了对比分析，定量分析了同步环节在阻抗特性中的角色和作用，揭示了决定 GFL 和 GFM 阻抗特性差异的主导因素。建立了 GFL 和 GFM 并网的三端口稳定性判据，分析了 GFM 接入提升新能源并网稳定性的原理。总结如下：

1) GFL 控制交流电流，对外呈现“电流源”特性，GFM 控制交流电压，对外呈现“电压源”特性。GFL 和 GFM 并网控制均需获取交流系统同

步相角，二者的获取方式不同，GFL 通过 PLL 获取，GFM 通过功率同步环节(一阶下垂控制或二阶 VSG 控制)获取；

2) 与 GFL 相比，GFM 阻抗幅值更低，相位呈现感性特性，在弱网场景下呈现更友好阻抗特性，其主导因素是 GFM 引入交流电压控制环节，GFL 与 GFM 并网控制不同同步环节仅对其带宽范围内阻抗特性起叠加辅助影响；

3) 相比于 GFL，GFM 更适应于弱网场景运行。一方面对现有运行于弱电网地区的 GFL 场站，通过并入部分容量的 GFM 可有效降低系统振荡风险，另一方面对未来新建场站，GFL 与 GFM 可按一定容量配比，实现新能源的友好并网、稳定运行。

参考文献

- [1] 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): 461-474.
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): 461-474(in Chinese).
- [2] 何洋, 杜忠明, 谭洪江, 等. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023: 1-3.
HE Yang, Du Zhongming, TAN Hongjiang, et al. Blue book on the development of new power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023: 1-3(in Chinese).
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 扩大内需战略规划纲要(2022—2035 年)[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2022.
National Development and Reform Commission. Outline of the strategic plan for expanding domestic demand(2022-2035) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2022(in Chinese).
- [4] LI Yitong, GU Yunjie, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4541-4554.
- [5] 梁军, 李传玥. 并网换流器控制模式发展及弱电网稳定研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3703-3711.
LIANG Jun, LI Chuanyue. Recent development of grid-connected inverters and weak-grid stabilization [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3703-3711(in Chinese).
- [6] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6547-6561.
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid (Part I): analysis of wideband impedance characteristics

- and oscillation mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6547-6561(in Chinese).
- [7] 武相强, 王贇程, 陈新, 等. 考虑频率耦合效应的三相并网逆变器序阻抗模型及其交互稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1605-1616.
WU Xiangqiang, WANG Yuncheng, CHEN Xin, et al. Sequence impedance model and interaction stability research of three-phase grid-connected inverters with considering coupling effects[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1605-1616(in Chinese).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] MATEVOSYAN J, MACDOWELL J, MILLER N, et al. A future with inverter-based resources: finding strength from traditional weakness[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(6): 18-28.
- [12] 辛焕海, 王宇轩, 刘晨曦, 等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5463-5473.
XIN Huanhai, WANG Yuxuan, LIU Chenxi, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5463-5473(in Chinese).
- [13] 王祺, 张泽轲, 郭杰帅, 等. 新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 504-516.
WANG QI, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technical path of active grid-forming of new type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 504-516(in Chinese).
- [14] 蔡希鹏, 黄伟煌, 李桂源, 等. 大规模光伏集群经柔性直流构网送出的运行控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8734-8744.
CAI Xipeng, HUANG Weihuang, LI Guiyuan, et al. Research on operation control strategy of large-scale photovoltaic cluster transmission via grid-forming VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8734-8744(in Chinese).
- [15] HARNEFORS L, HINKKANEN M, RIAZ U, et al. Robust analytic design of power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 5810-5819.
- [16] HARNEFORS L, RAHMAN F M M, HINKKANEN M, et al. Reference-feedforward power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8878-8881.
- [17] 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).
- [18] 伍文华, 周乐明, 陈燕东, 等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1411-1420.
WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, et al. Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional grid-connected inverter in the view of sequence impedance [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1411-1420(in Chinese).
- [19] 伍文华, 陈燕东, 周乐明, 等. 虚拟同步发电机接入弱电网的序阻抗建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1560-1571.
WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability analysis for virtual synchronous generator connected to the weak grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1560-1571 (in Chinese).
- [20] XU Yunyang, NIAN Heng, KANG Jun, et al. Impedance-based analysis of potential stability risk between grid-forming and grid-following wind turbine systems[C]//Proceedings of 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. Chongqing, China: IEEE, 2021.
- [21] 谢震, 许可宝, 秦世耀, 等. 基于电压源型和电流源型双馈风电机组稳定性对比分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1724-1733.
XIE Zhen, XU Kebao, QIN Shiyao, et al. Comparative analysis of doubly-fed wind turbine stability based on voltage source and current source[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1724-1733 (in Chinese).

附录

<http://ntps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231572>



雷雨

在线出版日期: 2024-01-25。

收稿日期: 2023-07-19。

作者简介:

雷雨(1996), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源并网建模与稳定性分析, leiyu@epri.sgcc.com.cn;

李光辉(1984), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源并网控制与稳定性分析;

王伟胜(1968), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统稳定分析和控制;

何国庆(1981), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源发电与并网技术;

郭梓暄(1992), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新能源并网建模与稳定性分析。

(责任编辑 邱丽萍)