

# 构网型储能变换器在新能源接入场景下 并网稳定性分析及提升策略

吴家杰, 陈新\*, 张东辉, 杨智毅

(江苏省新能源发电与电能变换重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省 南京市 211106)

## Grid-connected Stability Analysis and Improvement Strategy for Grid-forming Energy Storage System in New Energy Access Scene

WU Jiajie, CHEN Xin\*, ZHANG Donghui, YANG Zhiyi

(Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion (Nanjing University of Aeronautics & Astronautics),  
Nanjing 211106, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** The grid-forming (GFM) energy storage system (ESS) is regarded as the key equipment for building a new-type power system because of its ability to solve new energy consumption and improve the rotational inertia of the system. This paper focuses on the influence of GFM-ESS access on the grid-connected stability of new energy power stations. First, the modeling and frequency characteristics of GFM-ESS and grid-following energy storage system (GFL-ESS) are presented, and the influence of GFM-ESS and GFL-ESS on the grid-connected system stability is analyzed. The results show that the GFM-ESS is more conducive to improving the grid-connected system stability. On this basis, the influence of the GFM-ESS on the impedance characteristics of the new energy power station is explored. In view of the prominent negative resistance characteristics of the new energy unit in the weak dominant frequency band, an autonomous impedance adaptive control is proposed to improve the impedance dominant ability of the GFM-ESS. Based on the real-time detection of the system resonance frequency, the autonomous impedance adaptation with different grid conditions is realized, the GFM-ESS can effectively improve the grid-connected system stability. Finally, the experimental verification of the relevant frequency characteristics and the effectiveness of the autonomous impedance adaptation control method are depicted by the hardware-in-the-loop platform.

**KEY WORDS:** new energy power station; grid-forming energy storage system (GFM-ESS); impedance adaptation control; stability analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目(52277186)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52277186).

**摘要:** 构网型储能变换器因具备解决新能源消纳、提升系统转动惯量等能力, 被视作构建新型电力系统的关键设备。文中围绕构网型储能接入对新能源场站并网稳定性的影响开展研究工作。首先建立构网型与跟网型储能变换器特征阻抗模型, 分析构网型与跟网型储能接入对于新能源场站并网稳定性的影响, 研究结果表明, 储能以构网形式接入更有利于提升新能源场站并网稳定性。在此基础上, 探究构网型储能变换器对于新能源场站阻抗特性的影响规律, 针对其弱主导频段中新能源机组负阻特性凸出问题, 提出一种提升构网型储能变换器阻抗主导能力的自主阻抗适配控制, 在系统谐振频率的实时检测基础之上, 实现不同电网工况下自适应阻抗适配, 有效提升了新能源场站并网系统稳定性。最后, 通过RT-LAB 控制硬件在环完成相关频率特性及其自主阻抗适配控制方法有效性的实验验证。

**关键词:** 新能源场站; 构网型储能; 阻抗适配; 稳定性分析

## 0 引言

2021年至今, 全国共有25个省区发布了新能源配储政策, “新能源+储能”组合运行模式已成为实现“双碳”目标的重要支撑<sup>[1-2]</sup>。一方面, 储能的接入不仅可以解决风光等可再生能源消纳问题, 提高新能源利用率<sup>[3]</sup>, 也可以满足新型电力系统多时间尺度上的功率平衡需求, 改善系统动态特性<sup>[4]</sup>。另一方面, 储能还为抑制新能源机组引发的电磁振荡问题提供技术实施基础, 为解决高比例并网装置接入及其分散安装方式所带来的谐波振荡问题以及抑制难题提供了新的思路<sup>[5-7]</sup>。

现有研究运用储能装置抑制新能源机组引发的振荡问题主要通过优化控制器参数<sup>[8-9]</sup>以及附加

有源阻尼控制<sup>[10-11]</sup>的方式实现。文献[8-9]建立了系统阻抗模型和状态空间模型,分析了储能变换器稳态运行点和控制环路参数对于系统稳定性的影响;文献[10-11]通过反馈输出电压和入网电流作为虚拟阻抗至储能变换器控制环路中,提升了系统整体阻尼水平。然而,上述文献仅考虑到储能以跟网控制形式接入情况。跟网模式依赖于锁相环实现并网装备与电网的同步,但锁相环与电网阻抗交互作用易引入额外负阻尼,恶化系统稳定性<sup>[12]</sup>。随着弱网稳定性问题不断突出,具有自同步特性的构网型变换器开始被广泛关注<sup>[13-14]</sup>。

储能以构网控制形式接入可以为新能源机组提供暂态频率/电压支撑,提升系统转动惯量<sup>[15-16]</sup>,并且构网型储能还有利于新能源系统稳定性的提升<sup>[17]</sup>。文献[18]给出了构网型储能系统与风场控制器参数的耦合影响规律以及不同电网工况下灵敏度分析,但是在某些情况下控制参数需满足动态要求以及故障穿越等指标,直接调整控制参数从而提高系统稳定性较为困难;文献[19]通过解耦下垂系数,在储能系统控制环路中引入阻尼环路来抑制系统振荡,然而文中未给出阻尼系数量化设计指标;文献[20]将构网型储能与网侧阻抗并联,在控制环路中引入功率折合系数用于提高电网强度,规避风场阻抗与电网阻抗在负阻区间的交点从而抑制振荡,然而在实际工程中电网阻抗不易测量,限制了该方法的实用性。综上所述,构网型储能为实现新能源场站谐振抑制提供了新的思路,但是构网型储能的阻抗调控潜力目前还未被充分挖掘,尤其是针对新能源接入场景下构网型储能的阻抗特征、振荡抑制作用机理及其阻抗协调控制方法等研究尚处于起步阶段。

鉴于此,本文围绕构网型储能接入对新能源场站并网稳定性影响开展研究工作。论文在建立的构网型与跟网型储能变换器阻抗模型基础上,对比储能接入方式对于新能源场站阻抗特性的影响,并分析构网型储能接入的优势;同时研究构网型储能变换器对于新能源场站阻抗影响的主导频段,并针对其弱主导频段中新能源机组负阻尼特性所导致的谐波振荡问题,提出一种提升构网型储能变换器阻抗主导能力的自主阻抗适配控制方法,可根据反馈的并网点谐振幅值频率信息,实现阻抗适配系数自适应调整;最后,通过硬件在环实时仿真系统对论文研究内容进行分析验证。

## 1 储能变换器的序阻抗建模

### 1.1 构网型储能变换器阻抗建模

图1给出了基于下垂控制的构网型储能变换器拓扑及其控制框图。其中: $V_{dc}$ 为储能直流侧电压; $v_{abc}$ 和 $i_{abc}$ 分别为变换器输出电压和电流; $i_{gabc}$ 为并网电流; $L_f$ 、 $C_f$ 为交流侧滤波电感和电容; $R_f$ 为阻尼电阻。

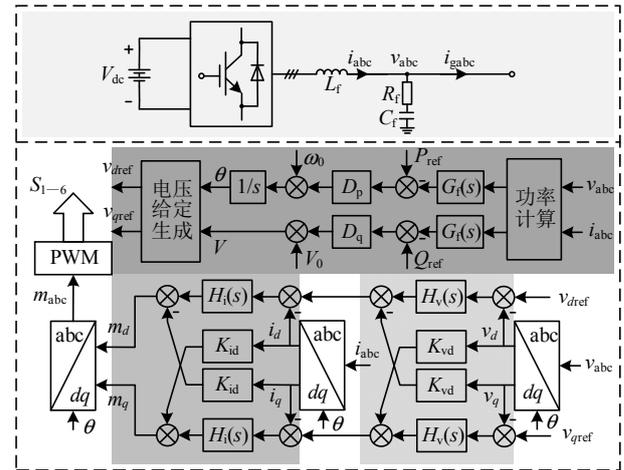


图1 构网型储能变换器拓扑及其控制框图

Fig. 1 Circuit and control diagram of the GFM-ESS

构网型储能变换器控制采用典型电压电流双内环下垂结构。 $D_p$ 和 $D_q$ 分别为有功下垂系数和无功下垂系数,用于模拟同步发电机的有功-频率和无功-电压下垂特性; $G_f(s)$ 为功率计算低通滤波器,使变换器具备了同步发电机的惯性阻尼特征<sup>[21]</sup>; $H_v(s)$ 和 $H_i(s)$ 分别为输出电压、电流控制调节器; $K_{vd}$ 和 $K_{id}$ 为 $dq$ 坐标系下电压环、电流环控制解耦系数。

根据图1所示主电路拓扑可得到功率电路小信号模型:

$$K_{PWM} \hat{m} = \mathbf{Z}_1 \hat{i} + \hat{v} \quad (1)$$

$$\hat{i} = \mathbf{Y}_2 \hat{v} + \hat{i}_g \quad (2)$$

式中: $K_{PWM}$ 为调制系数; $\hat{v}$ 、 $\hat{i}$ 、 $\hat{i}_g$ 、 $\hat{m}$ 分别为输出电压、输出电流、并网电流以及调制信号的小信号谐波向量,各元素对应的频率如下所示,其中 $f_1$ 和 $f_p$ 分别为基波频率和扰动频率。

$$\{f_p - 2f_1, f_p - f_1, f_p, f_p + f_1, f_p + 2f_1\}$$

$\mathbf{Z}_1$ 与 $\mathbf{Y}_2$ 为对角矩阵,表示在不同小信号频率下的交流侧滤波器阻抗:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_1 = \text{diag}\{(s + jn\omega) L_f\}_{n=-2, -1, 0, 1, 2} \\ \mathbf{Y}_2 = \text{diag}\{1 / (R_f + \frac{1}{s + jn\omega} C_f)\}_{n=-2, -1, 0, 1, 2} \end{cases}$$

式中  $\omega_1$  为基波角频率。

根据图 1 所示控制框图可得控制电路小信号模型：

$$\hat{m} = (U + E_v + J_v)\hat{v} + (Q + E_i + J_i)\hat{i} \quad (3)$$

式中： $Q$  为与输出电流相关的增益矩阵；矩阵  $U$  为与输出电压相关的增益矩阵；矩阵  $E_v$ 、 $E_i$ 、 $J_v$ 、 $J_i$  为与功率环相关的增益矩阵。

联立上述公式可得构网型储能变换器序阻抗系数矩阵为式(4)所示标准形式：

$$\mathbf{Z}_M = (\mathbf{R}_{M2} + \mathbf{R}_{M3} - \mathbf{Z}_1 \mathbf{Y}_2 - \mathbf{e}_{5 \times 5})^{-1} (\mathbf{R}_{M1} - \mathbf{Z}_1) \quad (4)$$

式(4)中所有元素均为  $5 \times 5$  矩阵。其中， $\mathbf{e}_{5 \times 5}$  为单位矩阵， $\mathbf{R}_{M1}$ 、 $\mathbf{R}_{M2}$ 、 $\mathbf{R}_{M3}$  为关联矩阵，如下：

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{M1} = K_{PWM} (\mathbf{Q} + \mathbf{E}_i + \mathbf{J}_i) \\ \mathbf{R}_{M2} = K_{PWM} (\mathbf{U} + \mathbf{E}_v + \mathbf{J}_v) \\ \mathbf{R}_{M3} = K_{PWM} (\mathbf{Q} \mathbf{Y}_2 + \mathbf{E}_i \mathbf{Y}_2 + \mathbf{J}_i \mathbf{Y}_2) \end{cases}$$

式(4)所示矩阵  $\mathbf{Z}_M$  为  $5 \times 5$  矩阵，其(3,3)位置元素代表构网型储能变换器扰动频率下端口电压电流关系，因此得到正序阻抗为

$$Z_{GFM-ESS}(s) = \mathbf{Z}_M(3,3) \quad (5)$$

### 1.2 跟网型储能变换器阻抗建模

图 2 为跟网型储能变换器控制框图。其主电路拓扑与构网型一致。控制结构采用恒定电流控制模式，图中： $H_i(s)$ 和  $H_\theta(s)$ 分别为输出电流控制和锁相环的调节器； $K_{id}$ 为  $dq$  坐标系下电流环控制解耦系数。

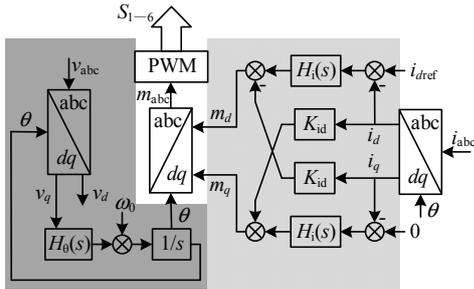


图 2 跟网型储能变换器控制框图

Fig. 2 Control diagram of the GFL-ESS

跟网型储能变换器推导方式与构网型相类似，这里不再展开。其序阻抗系数矩阵可以表示为式(6)所示标准形式：

$$\mathbf{Z}_L = (\mathbf{R}_{L2} + \mathbf{R}_{L3} - \mathbf{Z}_1 \mathbf{Y}_2 - \mathbf{e}_{5 \times 5})^{-1} (\mathbf{R}_{L1} - \mathbf{Z}_1) \quad (6)$$

式中关联矩阵  $\mathbf{R}_{L1}$ 、 $\mathbf{R}_{L2}$ 、 $\mathbf{R}_{L3}$  表达式如下：

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{L1} = K_{PWM} \mathbf{Q} \\ \mathbf{R}_{L2} = K_{PWM} \mathbf{P} \\ \mathbf{R}_{L3} = K_{PWM} \mathbf{Q} \mathbf{Y}_2 \end{cases}$$

式中矩阵  $\mathbf{P}$  为与锁相环相关的增益矩阵，其余矩阵代表意义与前文一致。

式(6)所示矩阵  $\mathbf{Z}_L$  为  $5 \times 5$  矩阵，其(3,3)位置元素代表跟网型变换器扰动频率下端口电压电流关系，因此得到正序阻抗为

$$Z_{GFL-ESS}(s) = \mathbf{Z}_L(3,3) \quad (7)$$

需要说明的是，对于光伏、直驱风机等并网装备，由于采用了如图 2 所示相同的跟网型并网控制结构，因此具有相同的阻抗系数矩阵，如式(6)所示。得到的新能源机组正序阻抗记为  $Z_{NES}(s)$ 。

## 2 新能源场站并网系统稳定性分析

图 3 给出考虑储能变换器接入的新能源场站应用系统结构，设定新能源发电机组功率为 100 kVA，一台 20 kVA 储能变换器配置于公共耦合点(point of common coupling, PCC)处汇接至电网。新能源机组和储能变换器均采用 LC 滤波器。新能源场站在 PCC 点处的聚合输出阻抗为二者并联阻抗，记为  $Z_{Tot}$ 。 $C_b$  为并联无功补偿电容， $L_g$  为电网线路阻抗，统归于电网阻抗  $Z_g$ 。

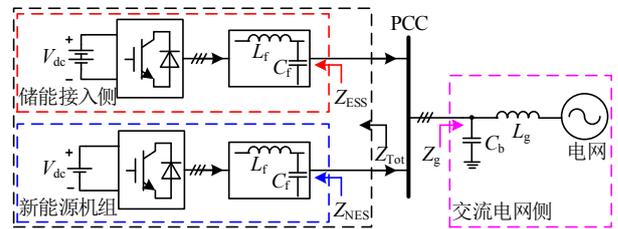


图 3 新能源场站并网结构图

Fig. 3 Grid-connected structure diagram of new energy power station

考虑储能变换器接入的新能源场站应用系统主要参数如表 1 所示。

表 1 考虑储能接入的新能源场站应用系统主要参数

Table 1 Main parameters of new energy station application system considering ESS access

参数	数值
额定功率/kVA	20
$V_{dc}/V$	700
$v_{abc}/V$	380
功率电路参数	
$L_f/mH$	2.3
$C_f/\mu F$	22.4
$R_f/\Omega$	0.72
储能变换器	
$D_p/10^{-4}$	6.28
构网控制参数	
$D_q/10^{-3}$	2.1
$G_i(s)$	$40\pi/(s+40\pi)$

续表

参数		数值	
储能变换器	构网控制参数	$H_v(s)$	$0.2+10/s$
		$H_i(s)$	1
	跟网控制参数	$H_\theta(s)$	$1.28+338/s$
		$H_i(s)$	$9.24+8797/s$
新能源机组	额定功率/kVA	100	
	$V_{dc}/V$	700	
	$v_{abc}/V$	380	
	$L_f/mH$	0.46	
	$C_f/mF$	0.11	
	$R_f/\Omega$	0.14	
	跟网控制参数	$H_\theta(s)$	$1.28+338/s$
	$H_i(s)$	$1.859+1759/s$	

2.1 储能接入对新能源场站阻抗特性影响分析

对于图3所示储能变换器与新能源机组并联接入电网的系统结构，其输出阻抗特性总是由二者共同影响决定。分别在储能变换器和新能源机组阻抗施加特定大小(10%)的幅值扰动，定义相应的聚合输出阻抗变化量分别为  $\Delta Z_{Tot-ESS}$ 、 $\Delta Z_{Tot-NES}$ ：

$$\begin{cases} \Delta Z_{Tot-ESS} = (1.1Z_{ESS}) \parallel Z_{NES} - Z_{ESS} \parallel Z_{NES} \\ \Delta Z_{Tot-NES} = Z_{ESS} \parallel (1.1Z_{NES}) - Z_{ESS} \parallel Z_{NES} \end{cases} \quad (8)$$

在阻抗幅值扰动基础上定义储能阻抗主导率  $\gamma$ ：

$$\gamma = \frac{|\Delta Z_{Tot-ESS}| \times 100\%}{|\Delta Z_{Tot-ESS}| + |\Delta Z_{Tot-NES}|} \quad (9)$$

当对储能变换器或新能源机组加入幅值扰动后，若储能阻抗主导率较大时(大于 75%)，表明储能变换器阻抗幅值扰动所产生并联等效阻抗变化量远大于新能源机组阻抗幅值扰动，即在该频段并联阻抗主要跟随储能变换器阻抗变化而调节，定义该频段为储能变换器强主导频段；若储能阻抗主导率较小时(小于 25%)，则表明在该频段并联阻抗主要受到新能源机组阻抗影响，对储能变换器而言即为非主导频段；当储能阻抗主导率介于 25%与 75%之间频段，本文定义为储能变换器弱主导频段。

图4(a)为构网型储能变换器接入时新能源场站的阻抗特性。由图可知，构网型储能变换器相角基本上位于  $-90^\circ \sim 90^\circ$  之间，负阻频段较窄。同时由于构网控制表现出电压源特性，其输出阻抗幅值相较跟网控制更低<sup>[22]</sup>，在一定程度上可以改善新能源场站阻抗特性。在 1~53 Hz 强主导频段内，此时场站阻抗特性以构网型储能变换器为主导，新能源机组锁相环带来的负阻尼特性被弱化。随着向 53 Hz 以

上弱主导频段过渡，新能源机组负阻尼特性逐渐凸显，场站阻抗特性被影响恶化，可能存在谐振风险。

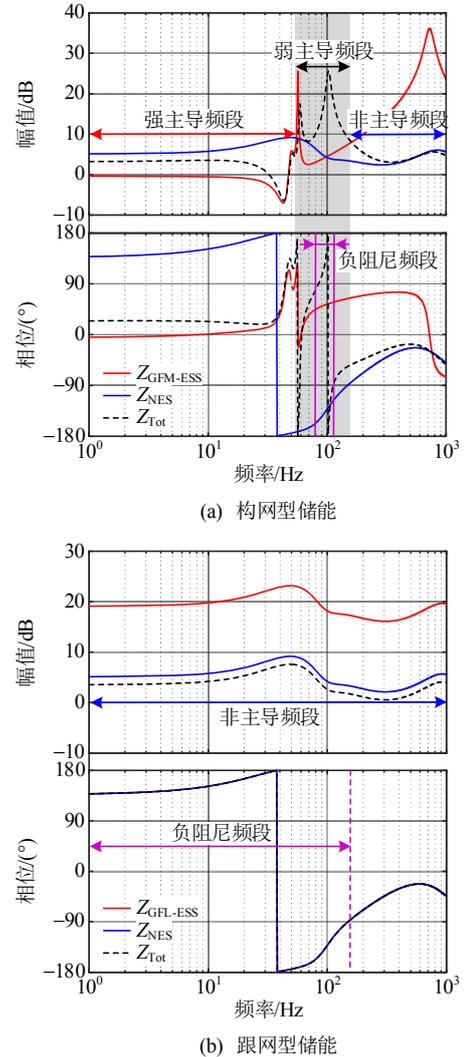


图4 构网型/跟网型储能对新能源场站阻抗特性的影响  
Fig. 4 The influence of GFM-ESS and GFL-ESS on impedance characteristic of new energy power station

图4(b)为跟网型储能变换器接入时新能源场站的阻抗特性。如图所示，由于功率等级差异(包括控制参数与滤波器等)，在全频段内跟网型储能阻抗幅值明显高于新能源机组，因此对于新能源场站整体阻抗而言，跟网型储能变换器呈现非主导特性。新能源场站阻抗仍存在较宽频段的负阻尼，在弱网条件下易与电网阻抗交互引发系统振荡。

2.2 不同储能接入方式下新能源场站稳定性分析

在新能源场站的PCC点处定义源-载阻抗断面(源侧阻抗为  $Z_{Tot}(s)$ ，载侧阻抗为  $Z_g(s)$ )，根据源-载阻抗比的Nyquist稳定性判据，可知新能源场站并网稳定当且仅当满足下列条件<sup>[23]</sup>：

- 1) 新能源场站  $Z_{Tot}(s)$ 在电网阻抗  $Z_g(s)=0$  时满

足自稳要求；

2) 阻抗比  $Z_g(s)/Z_{Tot}(s)$  满足奈奎斯特(Nyquist)稳定性判据, 即  $Z_g(s)$  和  $Z_{Tot}(s)$  的幅值曲线不存在交截, 或存在交截时, 其交截频率  $f_{int}$  处相位裕度为正, 相位裕度表达式如下:

$$P_M = 180^\circ - [\angle Z_g(j2\pi f_{int}) - \angle Z_{Tot}(j2\pi f_{int})] \quad (10)$$

图 5 为储能变换器以构网/跟网形式接入对于新能源场站并网稳定性的影响。由图可知, 在短路比(short circuit ratio, SCR)为 3.83 工况下, 当新能源场站不接入储能时, 阻抗交截频率为 171 Hz, 对应相位裕度为  $3.39^\circ$ , 此时系统阻尼能力较弱。当接入构网型储能后, 由于受到其中低频段阻抗特性的影响, 新能源场站负阻尼得到较为明显的弱化和改善, 阻抗曲线交截处相位裕度由  $3.39^\circ$  提升至  $38.35^\circ$ , 系统稳定性得到显著提高。然而当储能以跟网形式接入时, 新能源场站阻抗幅值降低导致交截频率前移, 系统阻尼能力进一步降低, 此时交截频率处对应相位裕度为  $-4.77^\circ$ , 由稳定性判据可知此时系统将发生 148 Hz 振荡。因此, 储能变换器以构网形式接入是提升新能源系统弱网稳定性的有效途径, 在后文所有分析中, 储能环节均是基于构网型控制接入条件。

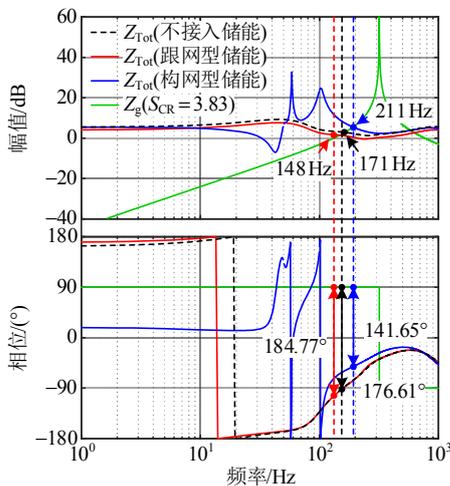


图 5 构网型/跟网型储能接入对并网系统稳定性影响

Fig. 5 The influence of GFM-ESS and GFL-ESS access on the stability of grid-connected system

### 2.3 含构网型储能的新能源场站振荡风险分析

由上文分析可知, 在风险频段内, 尽管构网型储能变换器的接入能够在一定程度上影响并改善新能源场站负阻尼特性, 但由于该频段内场站阻抗还同时受到新能源机组影响, 并且储能变换器主导能力有限, 新能源机组引入的负阻频段无法被完全

弱化消除, 可能存在振荡风险。

图 6 给出不同电网工况下, 构网型储能接入时新能源场站并网稳定性分析。如图所示, 当电网工况  $SCR=1.86$  时, 电网阻抗与新能源场站输出阻抗交于 118 Hz, 对应相位裕度为  $-6.82^\circ$ , 此时并网系统将发生振荡。随着电网短路比 SCR 进一步降低至 1.7 和 1.54, 阻抗交截频率处相位裕度降低, 分别为  $-21.1^\circ$  和  $-59.8^\circ$ , 此时在负阻尼作用下并网系统将很快振荡失稳。

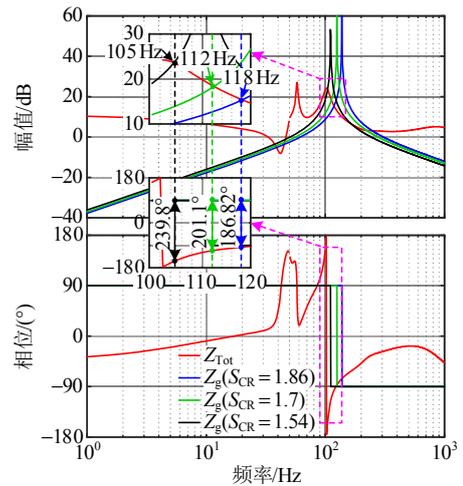


图 6 不同电网工况下, 并网系统稳定性分析

Fig. 6 Stability analysis of grid-connected system with different grid conditions

## 3 基于构网型储能变换器主导能力提升的自主阻抗适配控制

由上文分析可知, 构网型储能变换器虽具有较好的阻抗特性, 但受到控制器带宽等限制, 其强主导频段较窄, 从而对中高频段内新能源场站阻抗的影响逐渐减弱。这也意味着对于运行在跟网控制下的新能源机组, 其锁相环带来的负阻尼在弱主导频段内被凸显, 使系统存在振荡风险。因此, 需要探讨一种阻抗适配控制思路, 使具有良好阻抗特性的构网型储能变换器强主导频段变宽, 削弱新能源机组负阻尼频段对于场站阻抗的影响, 优化其阻抗特性, 以达到提升并网系统稳定性的目的。

### 3.1 构网型储能变换器阻抗适配控制

针对上述问题, 考虑在储能变换器输出阻抗侧并联 RLC 电路以降低输出阻抗幅值, 提高构网型储能在新能源机组负阻特性频段的阻抗主导强度, 示意图如图 7 所示, 图中:  $Z_{fit}$  为 RLC 适配阻抗;  $Z_{ESS-fit}$  为从端口看进去并联  $Z_{fit}$  后的输出阻抗。

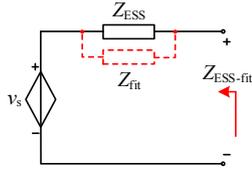


图7 输出阻抗并联 RLC 等效示意图

Fig. 7 The equivalent diagram of impedance parallel RLC

等效到控制中将输出电压反馈信号经过阻抗适配控制器引入至电流反馈环节, 得到的基于输出阻抗并联的阻抗适配控制框图如图 8 所示, 其中:  $G_{cli}(s)$  为电流环闭环传递函数;  $G_{fit}(s)$  为阻抗适配控制器, 传递函数如下:

$$G_{fit}(s) = \frac{sC_{fit}}{s^2L_{fit}C_{fit} + sC_{fit}R_{fit} + 1} \quad (11)$$

式中  $R_{fit}$ 、 $L_{fit}$ 、 $C_{fit}$  为幅值调控适配阻抗值。

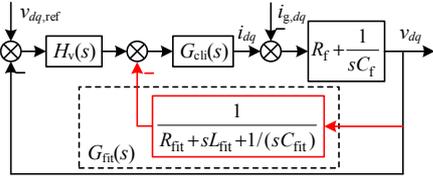


图8 基于输出阻抗并联的阻抗适配控制框图

Fig. 8 Control diagram of the impedance adaptation based on impedance parallel RLC

建立加入阻抗适配控制时构网型储能变换器序阻抗系数矩阵:

$$\mathbf{Z}'_M = (\mathbf{R}'_{M2} + \mathbf{R}'_{M3} - \mathbf{Z}_1\mathbf{Y}_2 - \mathbf{e}_{3 \times 5})^{-1}(\mathbf{R}'_{M1} - \mathbf{Z}_1) \quad (12)$$

其中关联矩阵  $\mathbf{R}'_{M1}$ 、 $\mathbf{R}'_{M2}$ 、 $\mathbf{R}'_{M3}$  表达式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{R}'_{M1} = K_{PWM}(\mathbf{Q} + \mathbf{E}_i + \mathbf{J}_i + \mathbf{V}_i) \\ \mathbf{R}'_{M2} = K_{PWM}(\mathbf{U} + \mathbf{E}_v + \mathbf{J}_v + \mathbf{V}_v) \\ \mathbf{R}'_{M3} = K_{PWM}(\mathbf{Q}\mathbf{Y}_2 + \mathbf{E}_i\mathbf{Y}_2 + \mathbf{J}_i\mathbf{Y}_2 + \mathbf{V}_i\mathbf{Y}_2) \end{cases}$$

式中矩阵  $\mathbf{V}_v$ 、 $\mathbf{V}_i$  为与阻抗适配控制相关的增益矩阵。同理提取  $\mathbf{Z}'_M$  扰动频率下端口电压电流关系, 得到加入阻抗适配控制后正序阻抗  $Z_{ESS-fit}(s)$ 。

构网型储能接入下新能源场站负阻尼主要集中在 80~140Hz 频段。为了简化设计过程, 可对构网型储能变换器风险频段处阻抗进行降阶化简。如图 9 所示, 功率环、电压环仅对输出阻抗 70Hz 以下低频段影响较大, 对于风险频段进行阻抗适配控制设计时, 可近似忽略功率环和电压环, 仅考虑电流环的影响。

对  $Z_{ESS-fit}(s)$  进行阻抗化简, 得到有关电流环和阻抗适配控制影响下的阻抗表达式如式(13)所示。由于表达式无法直观分析阻抗适配控制对于变换器

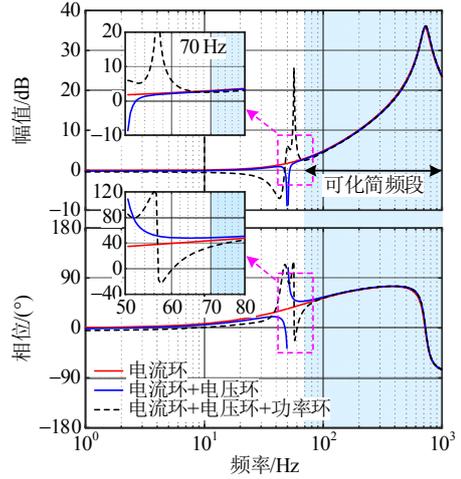


图9 构网型储能变换器环路简化对比

Fig. 9 Comparison of loop simplification of GFM-ESS

输出阻抗影响, 对式(13)进一步整理, 得到不加入阻抗适配控制的化简阻抗如式(14)所示。联立式(13)、(14)可得式(15)所示形式, 其中  $K_{fit}(s)$  为阻抗适配控制的等效阻抗调节器, 表达式如式(16)所示。

式(15)表明, 在加入阻抗适配控制后, 等效在原有阻抗  $Z_{ESS}(s)$  基础上乘以等效阻抗调节器  $K_{fit}(s)$ 。

$$Z_{ESS-fit}(s) = [L_f s + K_{PWM} H_i(s - j\omega)] / [K_{PWM} G_{fit}(s - j\omega) H_i(s - j\omega) + L_f C_f s^2 + K_{PWM} C_f H_i(s - j\omega) s + 1] \quad (13)$$

$$Z_{ESS}(s) = \frac{L_f s + K_{PWM} H_i(s - j\omega)}{L_f C_f s^2 + C_f K_{PWM} H_i(s - j\omega) s + 1} \quad (14)$$

$$Z_{ESS-fit}(s) = Z_{ESS}(s) K_{fit}(s) \quad (15)$$

$$K_{fit}(s) = [L_f C_f s^2 + K_{PWM} C_f H_i(s - j\omega) s + 1] / [K_{PWM} G_{fit}(s - j\omega) H_i(s - j\omega) + L_f C_f s^2 + K_{PWM} C_f H_i(s - j\omega) s + 1] \quad (16)$$

上述  $G_{fit}(s)$  中心频率可通过式(17)确定:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{fit} C_{fit}}} + f_i \quad (17)$$

对于阻抗适配控制器影响频段, 定义  $G_{fit}(s)$  作用带宽  $B_W$  为中心频率两侧幅值下降 3 dB 频段。此时上下限频率可根据式(18)确定:

$$\begin{cases} (f_{bw1} - f_i)(f_{bw2} - f_i) = (f_c - f_i)^2 \\ B_W = f_{bw2} - f_{bw1} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $f_{bw1}$  为下限频率;  $f_{bw2}$  为上限频率。

同时定义储能变换器阻抗适配系数为  $\lambda$ , 并且设计时考虑与  $f_c$  相适配, 即:

$$\left| \frac{Z_{ESS-fit}(s)}{Z_{ESS}(s)} \right|_{s=j2\pi f_c} = \lambda \quad (19)$$

由式(19)进而可得：

$$|K_{fit}(s)|_{s=j2\pi f_c} = \lambda \quad (20)$$

式(20)表明，通过对  $K_{fit}(s)$  进行设计，可定量调控构网型储能变换器阻抗适配程度，从而拓宽构网型储能变换器强主导频段范围，尤其是可改善弱主导频段内新能源场站负阻尼阻抗特性。

联立式(17)、(18)、(20)即可得到适配阻抗值。

下文将针对  $f_c$ 、 $B_w$ 、 $\lambda$  参数设计展开进一步分析。

### 3.2 阻抗适配参数对新能源场站阻抗特性影响分析

#### 3.2.1 中心频率影响分析

图 10 分别为在作用带宽  $B_w=80$  Hz、适配系数  $\lambda=0.8$  条件下，中心频率  $f_c$  取 80、120、160 Hz 时新能源场站输出阻抗对比。由图可知， $f_c$  主要影响储能变换器对于新能源场站阻抗优化的中心点。当  $f_c$  分别取 80、160 Hz 时，新能源场站负阻频段由原有 30 Hz 减小至 20、13 Hz，然而当  $f_c$  取 120 Hz 时(最靠近谐振频率)，场站负阻尼特性被完全改善。因此设定  $f_c$  与谐振频率相近时，储能变换器对于新能源场站负阻尼优化效果较好。

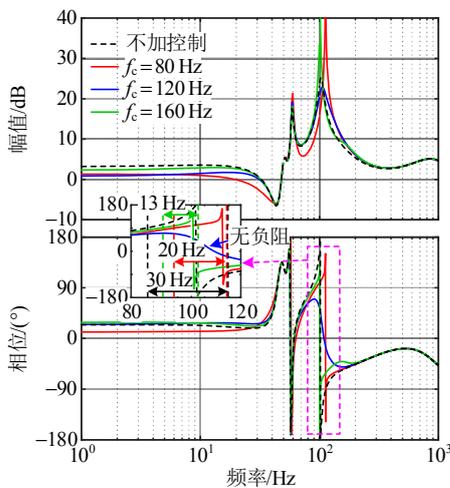


图 10 不同中心频率  $f_c$  下，新能源场站阻抗对比

Fig. 10 Impedance comparison of new energy power station with different center frequency

#### 3.2.2 作用带宽影响分析

图 11 给出在中心频率  $f_c=120$  Hz、适配系数  $\lambda=0.8$  条件下，作用带宽  $B_w$  分别取 20、80、140 Hz 时新能源场站输出阻抗对比。如图所示， $B_w$  主要与储能变换器对于新能源场站阻抗特性影响频段范围有关。在  $B_w$  由 20~140 Hz 变化过程中，储能变换器对于场站阻抗特性影响范围逐渐变大，负阻频段由 30 Hz 不断削减。随着阻抗适配控制器作用带宽包含风险频段，新能源场站负阻尼频段几乎被

完全改善，此时继续增大  $B_w$  优化效果较为有限。

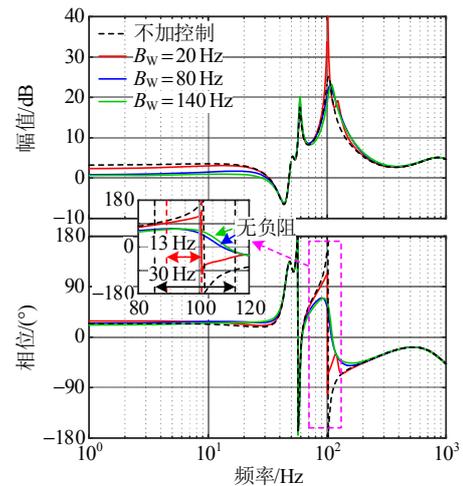


图 11 不同作用带宽  $B_w$  下，新能源场站阻抗对比

Fig. 11 Impedance comparison of new energy power station with different action bandwidth

#### 3.2.3 适配系数影响分析

图 12 分别为在中心频率  $f_c=120$  Hz、 $B_w=80$  Hz 条件下，适配系数  $\lambda$  取 0.9、0.8、0.7 时的新能源场站输出阻抗对比。由图可知， $\lambda$  表征了储能变换器对于新能源场站阻抗特性的影响程度。在  $\lambda$  由 0.9~0.7 的变化过程中，储能变换器对于新能源场站阻抗特性影响逐渐变强，即弱主导频段逐渐向强主导频段过渡。此时新能源场站相角特性对比不加入阻抗适配控制时有明显改善，风险频段内负阻由原先 30 Hz 逐渐减小，直至被完全消除。

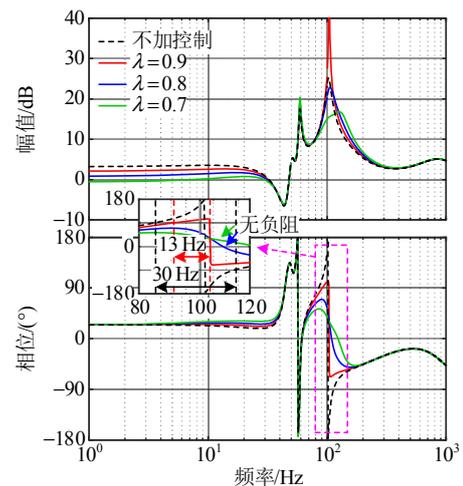


图 12 不同适配系数  $\lambda$  下，新能源场站阻抗对比

Fig. 12 Impedance comparison of new energy power station with different adaptation coefficients

### 3.3 自主阻抗适配方法设计

基于上文分析，中心频率  $f_c$  需设计在振荡频率  $f_{os}$  处，并且作用频段  $B_w$  选取范围需与新能源场站

风险频段  $B_{Wos}$  相匹配, 此时调节  $K_{fit}(s)$  使储能变换器阻抗幅值在  $f_{os}$  处下降为原来的  $\lambda$  倍, 即满足如下关系:

$$s.t. = \begin{cases} f_c = f_{os} \\ B_W = B_{Wos} \\ \|K_{fit}(s)\|_{s=j2\pi f_{os}} = \lambda \end{cases} \quad (21)$$

考虑到电网工况的变化和阻抗适配控制器的优化效果, 本文拟构建的自主阻抗适配控制流程图如图 13 所示, 图 14 为其对应控制框图。

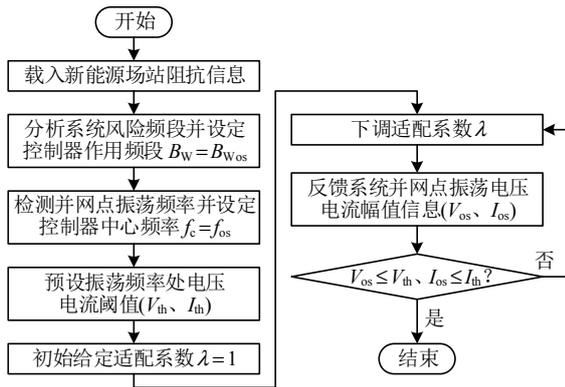


图 13 自主阻抗适配控制流程图

Fig. 13 Flow chart of the autonomous impedance adaptation control

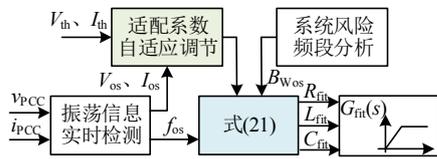


图 14 自主阻抗适配控制框图

Fig. 14 Control diagram of autonomous impedance adaptation control

如图 13 所示, 当并网系统稳定时  $\lambda=1$ , 储能变换器阻抗幅值不进行调控, 此时并联 RLC 无穷大。当阻抗交截频率进入到风险频段时, 新能源场站将与电网发生谐振, 并网点电压电流将含有大量的谐振分量。分析此时新能源场站风险频段, 并设定控制器作用带宽  $B_W$  与之匹配, 检测振荡频率信息送入到控制器中与中心频率  $f_c$  相匹配。同时反馈振荡频率处电压电流幅值信息 ( $V_{os}$ 、 $I_{os}$ ) 与预设电压电流阈值 ( $V_{th}$ 、 $I_{th}$ ) 作对比, 自适应的调整阻抗适配系数  $\lambda$ , 最终  $\lambda$  会被调整到一个临界值使得谐振频率处电压电流满足预设抑制要求, 该谐波电压电流抑制要求可参照并网标准设定。

图 15 给出了在  $S_{CR}=1.86$  电网工况下, 适配系数  $\lambda$  自适应调整过程中并网系统稳定性的提升。该

工况下, 由于阻抗交截频率处相位裕度为  $-6.82^\circ$ , 系统将在  $118\text{Hz}$  处发生谐振。此时  $\lambda$  下调, 加强储能变换器对于风险频段阻抗特性主导能力, 弱化新能源机组带来的负阻影响。当  $\lambda$  调至  $0.95$  时, 交截频率处相位裕度提升至  $-1.09^\circ$ , 由于相位裕度为负, 系统仍不稳定,  $\lambda$  继续下调。在  $\lambda$  继续调整的过程中, 新能源场站的阻抗特性在风险频段内得到明显改善, 系统振荡消失。若此时并网点电压电流谐波分量大小满足并网指标要求,  $\lambda$  将维持该临界值不再进行调整。

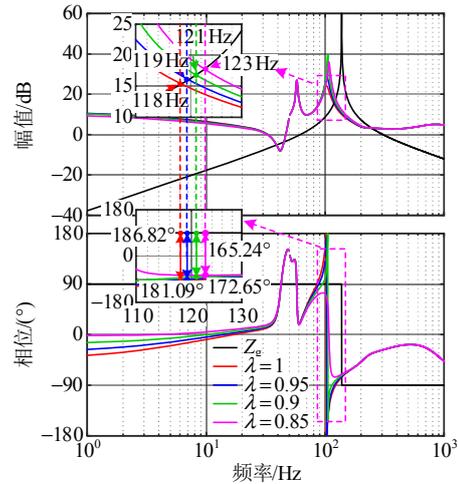


图 15 适配系数变化时并网系统稳定性分析

Fig. 15 Stability analysis of grid-connected system with the variable adaptation coefficient

#### 4 RT-LAB 控制硬件在环验证

本文基于 RT-LAB(OPAL-RT 5600)控制硬件在环实时仿真平台对新能源场站稳定性分析结论的正确性及构网型储能变换器自主阻抗适配控制方法的有效性进行实验验证, 实验平台如图 16 所示。

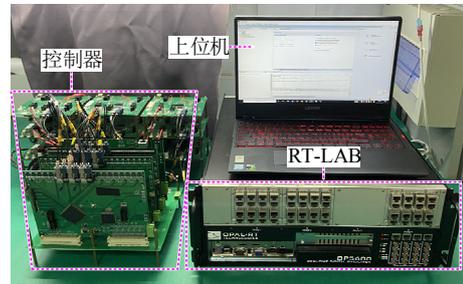


图 16 基于 RT-LAB 硬件在环实验平台

Fig. 16 A RT-LAB simulator-based HIL experimental platform

##### 4.1 储能变换器接入方式对场站稳定性影响验证

通过 RT-LAB 硬件在环平台进行阻抗在线测量, 扫频验证结果如下所示。图 17 给出了构网型

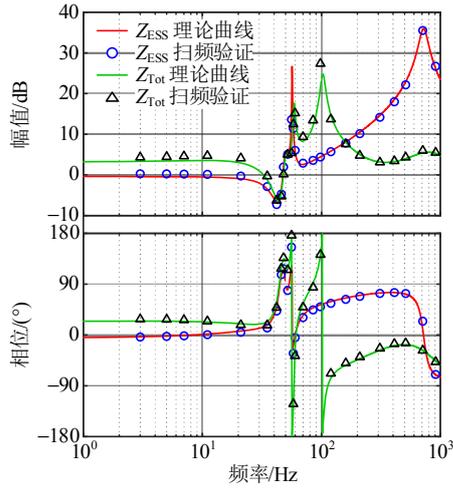


图 17 构网型储能变换器与新能源场站阻抗验证  
**Fig. 17 Impedance verification of GFM-ESS and new energy power station**

储能变换器和新能源场站的阻抗扫频结果，与理论曲线基本吻合，这表明了所建阻抗模型的正确性。

图 18 给出了在  $S_{CR}=3.83$  工况下，储能以跟网形式接入时新能源场站 PCC 点的电压电流波形，其对应傅里叶分析结果如图 19 所示。这说明，跟网型储能的接入使得新能源场站等效阻抗与电网阻抗满足谐振条件，此时 PCC 点电压电流畸变严重，振荡频率为 146 Hz，与理论分析基本一致。然而当储能运行在构网控制下时，新能源场站的负阻频段将会被其改善，在同样电网工况下系统仍可以维持稳定，此时 PCC 点的电压电流波形如图 20 所示。

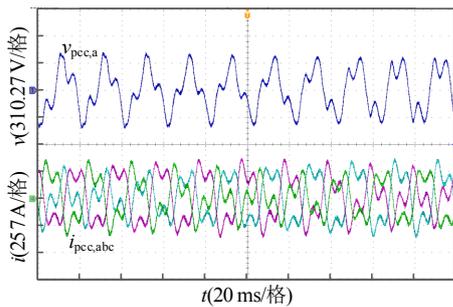
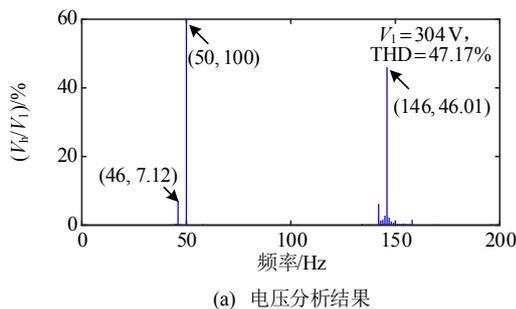
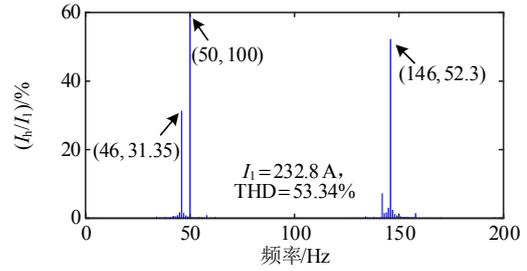


图 18 跟网型储能接入时 PCC 点电压电流波形( $S_{CR}=3.83$ )  
**Fig. 18 The PCC voltage and current waveform with GFL-ESS ( $S_{CR}=3.83$ )**



(a) 电压分析结果



(b) 电流分析结果

图 19 跟网型储能接入 PCC 点傅里叶分析结果( $S_{CR}=3.83$ )  
**Fig. 19 FFT results of PCC voltage and current waveform with GFL-ESS ( $S_{CR}=3.83$ )**

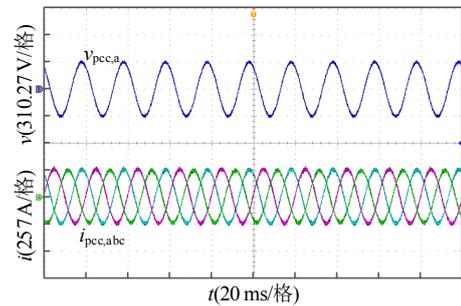
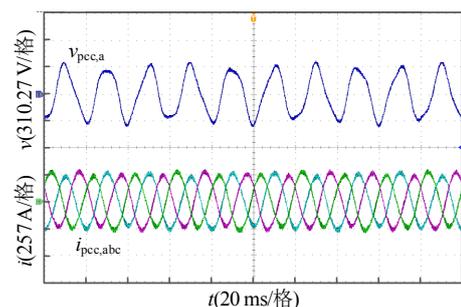


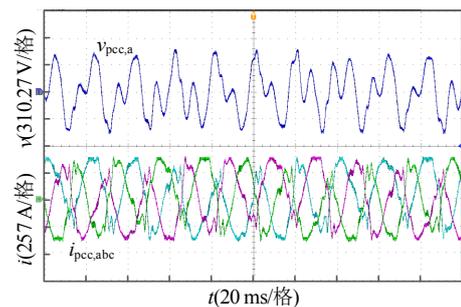
图 20 构网型储能接入时 PCC 点电压电流波形( $S_{CR}=3.83$ )  
**Fig. 20 The PCC voltage and current waveform with GFM-ESS ( $S_{CR}=3.83$ )**

#### 4.2 构网型储能变换器自主阻抗适配控制方法验证

由前文分析可知，随着电网强度降低，构网型储能变换器弱主导频段内新能源机组负阻尼特性容易激发振荡风险，图 21(a)给出了在  $S_{CR}=1.86$  工况下，PCC 点电压电流波形，对其做傅里叶分析，



(a)  $S_{CR}=1.86$



(b)  $S_{CR}=1.7$

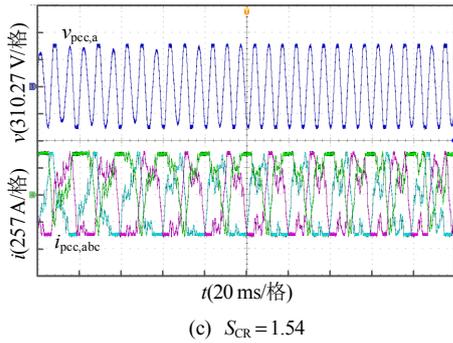
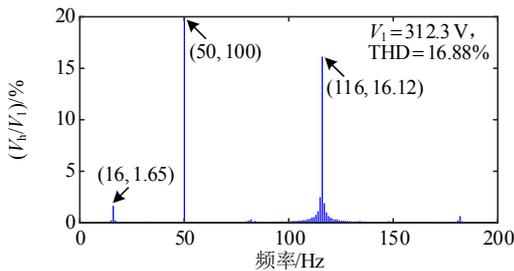


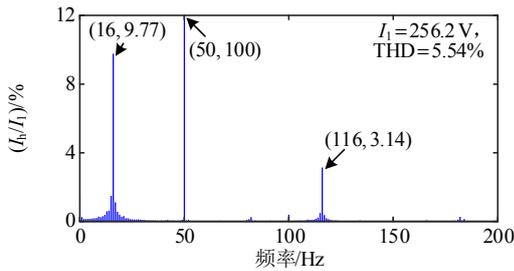
图 21 未阻抗适配时 PCC 点电压电流波形

Fig. 21 The PCC voltage and current waveforms without the impedance adaptation control

结果如图 22 所示，电压电流中含有 116 Hz 谐波分量，与理论分析结果基本吻合。随着 SCR 由 1.86~1.54 变化，PCC 点电压电流波形如图 21(b)、(c)所示，并网系统相位裕度进一步降低，谐振愈加剧烈。这也说明有必要提高构网型储能变换器的阻抗主导能力，以弱化新能源机组负阻尼特性所带来的振荡风险。



(a) 电压分析结果



(b) 电流分析结果

图 22 未阻抗适配时 PCC 点傅里叶分析结果( $S_{CR}=1.86$ )

Fig. 22 FFT results of PCC voltage and current without the impedance adaptation control ( $S_{CR}=1.86$ )

图 23 为加入阻抗适配控制后构网型储能变换器与新能源场站的阻抗扫频结果。与图 17 对比分析可知，加入阻抗适配控制拓宽了储能变换器强主导频段，改善了新能源场站基频外的负阻尼特性。

在并网系统发生谐振时，对构网型储能变换器加入本文所提自主阻抗适配控制后的 PCC 点电压电流波形如图 24 所示，随着适配系数自适应调节，

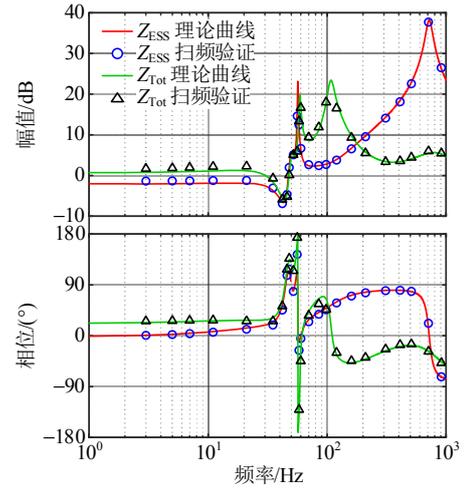


图 23 加入阻抗适配控制后构网型储能与场站阻抗验证

Fig. 23 Impedance verification of GFM-ESS and new energy station with the impedance adaptation control

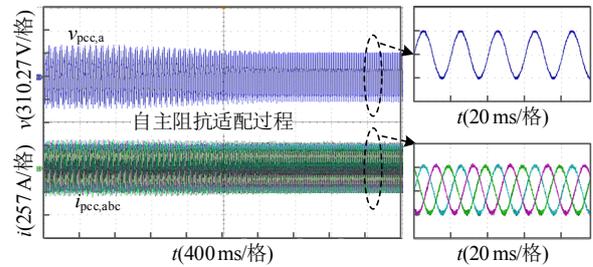


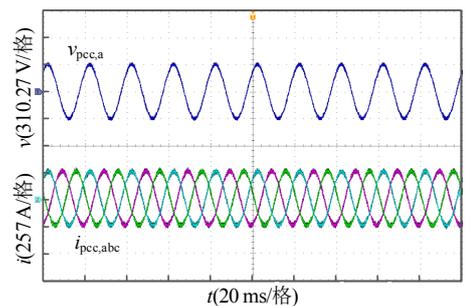
图 24 自主阻抗适配过程中 PCC 点电压电流波( $S_{CR}=1.86$ )

Fig. 24 The PCC voltage and current waveform in the process of autonomous impedance adaptation ( $S_{CR}=1.86$ )

系统逐渐由不稳定进入稳定状态。图 25 为在电网工况改变时，适配完成后 PCC 点电压电流波形，对比图 21 可知，本文所提自主阻抗适配控制可实现不同电网工况下构网型储能变换器阻抗特性自适应有效调节。

图 26 给出了图 24、25 对应的电压电流傅里叶分析结果，可以看出，并网点电压总谐波含量从 16.88% 下降至 3% 左右，并网电流总谐波含量小于 4.4%，原有的 116 Hz 处谐波振荡得到有效抑制，这与前面频域理论分析结果一致。

综上，加入阻抗适配控制提升了储能变换器对



(a)  $S_{CR}=1.7$

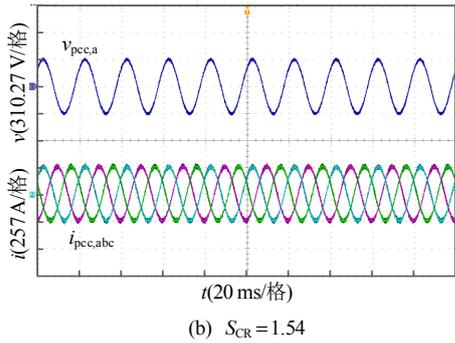
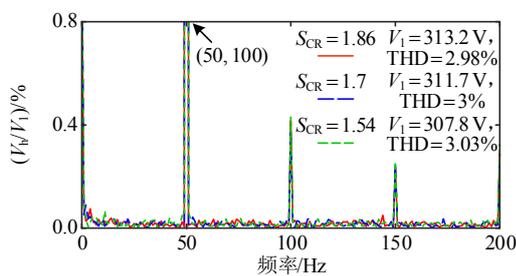
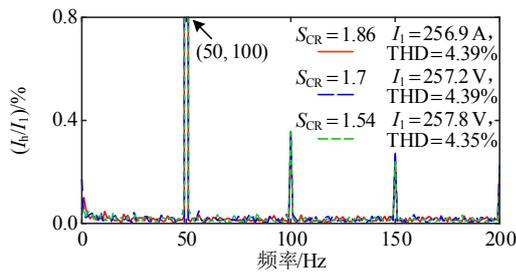


图 25 自主阻抗适配完成后 PCC 点电压电流波形  
Fig. 25 The PCC voltage and current waveform after the autonomous impedance adaptation is completed



(a) 电压分析结果



(b) 电流分析结果

图 26 自主阻抗适配后 PCC 点傅里叶分析结果  
Fig. 26 FFT results of PCC voltage and current after the autonomous impedance adaptation is completed

新能源场站风险频段阻抗特性的主导能力，削弱了新能源机组负阻尼凸显问题，提升了系统稳定性，同时构网型储能变换器的自适应阻抗适配设计实现了新能源接入在不同电网工况下的自主稳定调节。实验结果验证了本文所提自主阻抗适配控制方法的有效性。

### 4.3 阻抗适配控制对构网调节性能的影响

本文所提自主阻抗适配控制仅针对风险频段内阻抗特性进行调节，原则上与功率同步环节和电压调节解耦，不会影响构网型储能变换器稳态工作性能。

为进一步验证自主阻抗适配控制对构网型储能变换器动态调节性能的影响。图 27 给出了构网型储能变换器在电网频率扰动条件下加入阻抗适

配控制前后的动态性能对比分析。当电网频率在 3 s 时从 50 Hz 变化到 49 Hz，4 s 后恢复至 50 Hz，从构网型储能变换器输出功率响应波形可以看出，加入适配阻抗前后，构网型储能在电网频率扰动下的输出功率超调量，调节时间等动态特性基本相同，即本文所设计的自主阻抗适配控制在实现并网系统振荡抑制的同时，对构网调节功能和动态性能基本不构成影响。

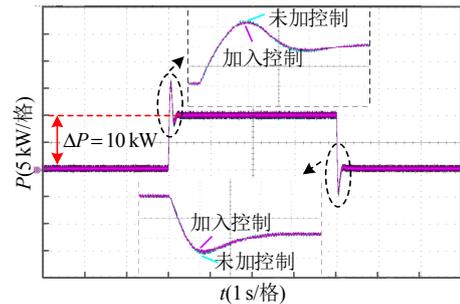


图 27 加入阻抗适配控制后构网型储能变换器动态性能  
Fig. 27 Dynamic performance of the GFM-ESS with the impedance adaptation control

## 5 结论

本文建立了构网型/跟网型储能变换器阻抗模型，分析了不同储能接入方式对于新能源场站阻抗特性的影响规律。并针对构网型储能变换器主导能力不足所导致的新能源机组负阻尼特性凸显问题，提出基于构网型储能阻抗主导能力提升的自主阻抗适配控制，研究结果表明：

- 1) 构网型储能控制特性决定其输出阻抗幅值对比跟网型储能较低，在一定程度上可以主导或影响新能源场站阻抗变化趋势。
- 2) 构网型储能虽具有较好的阻抗特性，但受控制器带宽等限制，在中高频段阻抗幅值上升较快(趋于无源特性)，强主导频段较窄。这就导致了新能源机组负阻尼特性在中频段被凸显，该负阻特性是导致系统发生振荡的主要因素。
- 3) 通过加入自适应阻抗适配，可以有效提升构网型储能弱主导频段内的阻抗调节能力。并且通过实时检测系统谐振频率，可实现不同电网工况下适配阻抗自主调节，有效提升了新能源场站稳定性。

## 参考文献

[1] 邹翔. 积极稳妥推进新型储能产业化[N]. 人民日报, 2023-05-08(005).  
ZOU Xiang. Actively and steadily promote the

- industrialization of new-type energy storage[N]. People's Daily, 2023-05-08(005).
- [2] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.  
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179(in Chinese).
- [3] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8(in Chinese).
- [4] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-168.  
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168(in Chinese).
- [5] 曹明浩, 于继来. 滚动考核下的新能源场站 - 电池储能单元运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7079-7090.  
CAO Minghao, YU Jilai. Operation strategy of renewable energy and battery integrated unit under rolling assessment of generation schedule [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7079-7090(in Chinese).
- [6] ZHU Yongli, LIU Chengxi, SUN Kai, et al. Optimization of battery energy storage to improve power system oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1015-1024.
- [7] ZHU Yongli, LIU Chengxi, WANG Bin, et al. Damping control for a target oscillation mode using battery energy storage[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 833-845.
- [8] 张勇, 孙同越, 李云丰, 等. 风电场融合电池储能的稳定性分析及阻尼控制器参数解析计算[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3517-3526.  
ZHANG Yong, SUN Tongyue, LI Yunfeng, et al. Stability analysis and parameters calculation of damping controller for wind power plant integrated with battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3517-3526(in Chinese).
- [9] YI Ming, HUANG Yunhui, ZHU Dang. Research on subsynchronous oscillation of photovoltaic and battery storage systems integrated to weak grid[C]//Proceedings of 2020 4th International Conference on HVDC. Xi'an, China: IEEE, 2020.
- [10] 莫必祥, 伍文华, 陈燕东, 等. 抑制直驱风电并网系统次/超同步振荡的储能变流器有源阻尼控制方法[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2380-2390.  
MO Bixiang, WU Wenhua, CHEN Yandong, et al. Active damping control for power conversion system to suppress sub-/super-synchronous oscillation of D-PMSG grid-connected system[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2380-2390(in Chinese).
- [11] YAN Yabing, ZHU Weijun, OUYANG Fan, et al. Battery energy storage power station based suppression method for power system broadband oscillation[C]//Proceedings of 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Changsha, China: IEEE, 2019.
- [12] 杨苓, 陈燕东, 周乐明, 等. 弱电网下锁相环对三相LCL型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3792-3804.  
YANG Ling, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Effect of phase locked loop on the small-signal perturbation modeling and stability analysis for three-phase LCL-type grid-connected inverter in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804(in Chinese).
- [13] SONG Guanhong, CAO Bo, CHANG Liuchen. Review of grid-forming inverters in support of power system operation[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 8(1): 1-15.
- [14] 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.
- [15] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-359.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359(in Chinese).
- [16] 许崇福, 李菀茹, 徐宁一, 等. 应用于储能变流器的虚拟同步发电机阻尼特性分析与改进[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1656-1663.  
XU Chongfu, LI Wanru, XU Ningyi, et al. Analysis and improvement of damping characteristics of virtual synchronous generator control applied to energy storage converter[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1656-1663(in Chinese).
- [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] ZHAO Fangzhou, WANG Xiongfei, ZHOU Zichao, et al. Control interaction modeling and analysis of grid-forming battery energy storage system for offshore wind power plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 497-507.
- [19] ZHOU Ziqi, PUGLIESE S, LANGWASSER M, et al. Sub-synchronous damping by battery storage system in grid forming control mode[C]//Proceedings of 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Detroit, MI, USA: IEEE, 2022.
- [20] LI Gaoxiang, CHEN Yandong, LUO An, et al. An enhancing grid stiffness control strategy of STATCOM/BESS for damping sub-synchronous resonance in wind farm connected to weak grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(9): 5835-5845.
- [21] LIU Jia, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [22] 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.
- [23] SUN Jian . Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.



吴家杰

在线出版日期：2023-10-24。

收稿日期：2023-06-26。

作者简介：

吴家杰(1998)，男，硕士研究生，研究方向为新能源发电并网系统控制与稳定性，WuJiaJie@nuaa.edu.cn；

\*通信作者：陈新(1973)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为分布式发电并网系统和微电网系统的建模、控制与稳定性等，chen.xin@nuaa.edu.cn；

张东辉(1994)，男，博士研究生，研究方向为新能源发电并网系统控制与稳定性，ceozdhceo@nuaa.edu.cn；

杨智毅(2000)，男，硕士研究生，研究方向为新能源发电并网系统建模与控制，yangzhiyi@nuaa.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)