

考虑电网强度的大型光伏电站并网系统谐波耦合建模与分析

洪嘉乐, 石晶, 陈红坤, 陈磊

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对大型光伏电站中大量电力电子变流器在不同系统工况下呈现出的复杂谐波耦合特性, 提出了一种基于谐波状态空间法的建模及分析方法。首先, 计及大型光伏电站中多发单元间的电气联系, 建立模块化且具备可扩展性的光伏电站并网系统谐波状态空间降阶模型。然后, 应用所建模型揭示了并网系统谐波耦合的交互过程机理。考虑光伏电站实际规划运行中电网强度变化, 研究不同规模光伏电站并网系统在不同电网强度下的谐波耦合特性, 表明并网系统谐波耦合的交互强度主要取决于谐波源对并网公共母线电压的影响程度。最后, 搭建了大型光伏电站并网系统的时域仿真模型, 仿真结果验证了所建谐波状态空间模型的准确性及其对谐波耦合特性分析的适用性。
关键词: 大型光伏电站并网系统; 谐波状态空间模型; 谐波耦合特性; 电网强度

Modeling and analysis of harmonic coupling in large-scale photovoltaic grid-connected systems considering grid strength

HONG Jiale, SHI Jing, CHEN Hongkun, CHEN Lei

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To address the complex harmonic coupling characteristics exhibited by a large number of power electronic converters in large-scale photovoltaic power plants under different operating conditions, a harmonic state-space-based modeling and analysis method is proposed. First, considering the electrical connections among multiple generation units in large PV power plants, a modular and scalable reduced-order harmonic state-space model of the grid-connected PV system is established. The proposed model is then used to analyze the interaction mechanisms of harmonic coupling in the grid-connected system. By accounting for variations in grid strength during the practical planning and operation of PV power plants, the harmonic coupling characteristics of grid-connected PV power plants under different grid strengths are investigated. The results indicate that the interaction strength of harmonic coupling mainly depends on the degree to which harmonic sources affect the voltage at the point-of-common-coupling. Finally, a time-domain simulation model of a large-scale photovoltaic grid-connected system is developed, and the simulation results verify the accuracy of the harmonic state-space model and its applicability for harmonic coupling analysis.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U23B20117).

Key words: large-scale photovoltaic grid-connected system; harmonic state-space model; harmonic coupling characteristics; grid strength

0 引言

随着我国新型电力系统的发展, 经电力电子变流器并网的新能源发电装机容量快速增长^[1-3], 其中, 光伏发电装机容量近年来增长尤为迅猛^[4-6]。大型光伏电站中包含众多的发电单元, 发电单元中 PV 阵列常采用基于 LCL 滤波的 DC-DC/DC-AC 两级式变流器接入交流电网, 数量庞大且复杂的电力电子

变流器互联运行不仅为电力系统带来了大量的谐波污染源^[7], 还引入了复杂的谐波耦合特性, 进而可能引发电力系统谐波稳定性问题^[8]。为保障电力系统的安全稳定运行, 亟须对含多发单元的大型光伏电站并网系统进行谐波耦合特性建模与分析。

针对不同的研究应用场景, 光伏电站并网系统应采用不同的建模方法^[9-10]。在分析并网逆变器与电网交互系统谐波稳定性时, 阻抗分析方法已成为实际工程中应用的一种重要方法, 文献[11]对该方法的建模和分析进行了较为全面的总结介绍。针对谐波

耦合特性分析, 电磁暂态时域仿真是普遍采用的一种方法, 例如基于 PSCAD/EMTDC 或 MATLAB/Simulink 等仿真程序, 建立时域模型以实现仿真分析在研究中的广泛应用。为探究基于电力电子变流器的并网系统内谐波耦合交互机理, 近年来解析建模方法受到了国内外学者的广泛关注。早期的谐波状态平均(state space averaging, SSA)法已经能反映同频率谐波之间的数学关系^[12], 但因为其应用平均化方法, 故不能反映异频谐波之间的相互作用; 广义谐波状态平均(generalized state space averaging, GSSA)法^[13]和扩展描述函数(extended describing function, EDF)法^[14]能描述低频谐波之间的相互作用, 但面对复杂拓扑及运行方式时的分析精度较差^[15]。针对时域中的周期性时变系统, 谐波状态空间(harmonic state space, HSS)法^[16-17]以状态空间方程为基础, 将其转换为频域中的线性时不变(linear time-invariant, LTI)系统^[18], 并推导类传递函数形式的谐波状态空间矩阵。HSS 法理论上可以考虑系统的全部谐波次数, 适用于电力电子变流器谐波特性的精确建模研究。文献[19]建立了三相两电平变流器的 HSS 模型, 并推导了相应的谐波状态空间矩阵。文献[20]推导了三相两电平变流器并网系统的开环控制和闭环控制 HSS 模型, 在此基础上提出了一种将三相 HSS 变流器模型简化至单相的 HSS 模型降维方法。针对大型光伏电站的多变流器并网系统场景, 文献[21]建立了含有多个 DC-DC/DC-AC 变流器的并网系统 HSS 模型, 利用所建模型研究揭示了多变流器级联拓扑中单一发电单元内的谐波耦合机理, 并利用平均化的方法分析了含多发电单元系统并网总电流的谐波特性; 文献[22]通过引入并网点虚拟阻抗进一步改进模型, 并将模型应用于并网系统稳定性分析; 文献[23]和文献[24]分别利用三相两电平变流器和典型三相 LCL 型并网变流器的闭环控制 HSS 模型推导了单一变流器两侧的谐波耦合特性。

现有研究成果已揭示了系统处于稳态时单一光伏单元内部的谐波耦合特性, 但对于大型光伏电站并网系统谐波耦合特性的研究仍有待进一步深入。1) 对于大型光伏电站并网系统的谐波耦合分析模型, 现有研究大多侧重于对单一光伏单元并网系统进行建模, 而拓展至具有多个光伏单元谐波耦合分析能力的大型光伏电站并网系统数学模型较为欠缺; 2) 对于大型光伏电站并网系统的谐波耦合现象, 涉及到光伏单元间或交流系统与任一光伏单元间的谐波耦合特性及作用过程有待进一步研究, 且鲜有研究考虑实际规划运行中所关注的电网强度变

化对不同规模大型光伏电站并网系统谐波耦合特性的影响。为此, 本文首先提出了含多发电单元的大型光伏电站并网系统谐波状态空间建模方法, 在考虑多个光伏单元间电气联系的基础上, 建立模块化且具有可扩展性的谐波状态空间降阶模型; 其次, 利用所建模型分析光伏单元之间以及交流系统与任一光伏单元之间的谐波耦合特性, 揭示谐波耦合的多次重复交互过程及耦合规律; 再次, 结合电力系统实际规划运行的分析需求, 研究电网强度变化对不同规模光伏电站并网系统谐波耦合特性的影响; 最后, 应用时域仿真验证了所建模型及分析结论的正确性。

1 多光伏单元并网系统

1.1 多光伏单元并网系统的电路拓扑

含多个光伏发电单元的大型光伏电站并网系统的电路拓扑如图 1 所示。该并网系统包含 n 个完整的两级式 LCL 型光伏发电单元(简称“光伏单元”)和 1 个用可控电压源等效逆变器输出的模拟单元。模拟单元用于模拟光伏单元变流器输出的谐波电压, 从而分析光伏单元间的谐波耦合特性。图 1 中, L_{dcn} 、 R_{dcn} 和 C_n 分别为直流侧的储能电感、虚拟电阻和稳压电容; L_j 、 R_j 分别为变流器侧滤波电感和寄生电阻, 其中 $j = \{n, t\}$, n 表示光伏单元, t 表示模拟单元; L_{gj} 、 R_{gj} 分别为交流侧滤波电感和寄生电阻; C_{dj} 、 R_{dj} 分别为阻尼电感和阻尼电阻; S_{mn} 为开关函数; e_{dc} 为 PV 阵列输出电压; i_{dc} 为 PV 阵列输出电流; v_{dc} 为变流器直流侧电压; i_l 为变流器交流侧输出电流; v_{cn} 为滤波器电容电压; i_{gn} 为单元

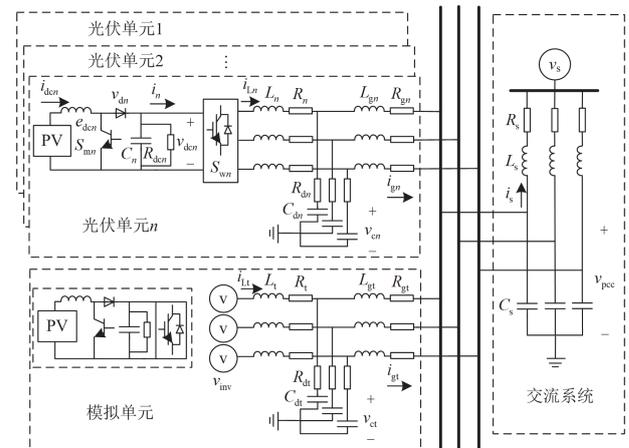


图 1 含多个光伏发电单元的大型光伏电站并网系统
Fig. 1 Grid-connected system of a large PV power station containing multiple PV generation units

并网电流。交流系统中： L_s 、 R_s 和 C_s 分别为交流系统等效电感、等效电阻和线路对地电容； v_{pcc} 为并网公共连接点电压； v_s 为交流系统等效电压； i_s 为交流系统总电流。

1.2 多光伏单元并网系统的开关函数拟合

光伏单元 n 中,开关函数 S_{mn} 可控制直流升压变频器的升压倍数,开关函数 S_{wn} 需保证逆变器的正常运行。 S_{mn} 主要影响同频谐波之间的激发^[21],故本研究主要考虑 S_{wn} 对单元间谐波耦合特性的影响。利用第一类贝叶斯函数对 S_{wn} 进行双边傅里叶变换^[19],变换次数 h 取研究选定的最大谐波次数。 S_{wn} 展开式如附录A式(A1)和式(A2)所示,双边傅里叶变换拟合后的三相开关函数示意图如图2所示。

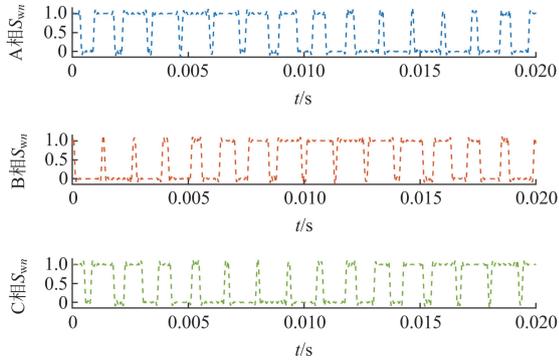


图2 逆变器开关函数双边傅里叶变换的三相拟合结果

Fig. 2 Three-phase fitting results of inverter switch function bilateral Fourier transform

2 基于HSS的多光伏单元并网系统建模

2.1 HSS模型简述

HSS模型的数学基础是状态空间方程。一个线性周期时变系统的状态空间方程为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

式中： $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{B}(t)$ 、 $\mathbf{x}(t)$ 和 $\mathbf{u}(t)$ 分别为系统的状态矩阵、输入矩阵、状态向量和输入向量； $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 为 $\mathbf{x}(t)$ 对时间 t 的导数。

对于一个稳态系统,可利用双边傅里叶变换将时域中的周期性变量转化为频域中的常量^[17],如式(2)所示。

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=-h}^h X_k e^{jk\omega_0 t} = \mathbf{E}\mathbf{X} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{E} = [e^{-jh\omega_0 t} & \dots & e^{-j\omega_0 t} & 1 & e^{j\omega_0 t} & \dots & e^{jh\omega_0 t}] \\ \mathbf{X} = [X_{-h} & \dots & X_{-1} & X_0 & X_1 & \dots & X_h]^T \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\omega_0 = 2\pi f$ 为系统基波角频率； X_h 为第 h 次谐

波对应的傅里叶系数； \mathbf{X} 为 $\mathbf{x}(t)$ 双边傅里叶展开后从 $-h$ 到 h 次的傅里叶系数组成的 $(2h+1)$ 阶向量。故式(2)可改写为

$$\mathbf{E}N_{2h+1}\mathbf{X} + \mathbf{E}\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{E}\mathbf{A}\mathbf{E}\mathbf{X} + \mathbf{E}\mathbf{B}\mathbf{E}\mathbf{U} \quad (4)$$

$$N_{2h+1} = \text{diag}(-jh\omega_0 \dots -j\omega_0 \ 1 \ j\omega_0 \dots jh\omega_0) \quad (5)$$

式中： \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{U} 分别为对 $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{B}(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$ 进行双边傅里叶展开后从 $-h$ 到 h 次的傅里叶系数组成的 $(2h+1)$ 阶向量； N_{2h+1} 为 $(2h+1) \times (2h+1)$ 阶对角阵。引入Toeplitz算子 Γ 对 $\mathbf{E}\mathbf{A}\mathbf{E}\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{E}\mathbf{B}\mathbf{E}\mathbf{U}$ 进行项数筛选,可将式(4)改写为

$$\mathbf{E}N_{2h+1}\mathbf{X} + \mathbf{E}\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{E} \cdot \Gamma[\mathbf{A}] \cdot \mathbf{X} + \mathbf{E} \cdot \Gamma[\mathbf{B}] \cdot \mathbf{U} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = (\Gamma[\mathbf{A}] - N_{2h+1}) \cdot \mathbf{X} + \Gamma[\mathbf{B}] \cdot \mathbf{U} \quad (7)$$

式中： $\Gamma[\mathbf{A}]$ 为基于向量 \mathbf{A} 构造的托普利兹矩阵。式(7)为该时变系统在 $-h$ 到 h 次上的HSS方程。当系统处于稳态时,系统状态量各次谐波的幅值和相角将不再随时间变化。此时式(7)可改写为^[17]

$$\mathbf{X} = [(\mathbf{N}_{2h+1} - \Gamma[\mathbf{A}])^{-1} \cdot \Gamma[\mathbf{B}]] \cdot \mathbf{U} \quad (8)$$

2.2 多光伏单元并网系统的HSS建模及降维

图1所示电路拓扑的关键电路节点均同时连接容性支路和感性支路,确保系统可被准确地建模为一阶微分状态空间方程的形式。此并网系统是一个非线性时变系统,在稳态工作点对其进行线性化^[23],列写状态空间方程。

1) 光伏单元 n 的状态空间方程

直流侧:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_{dcn}}{dt} = \frac{1}{L_{dcn}} \cdot \Delta e_{dcn} - \frac{(1-S_{mn})}{L_{dcn}} \cdot \Delta v_{dcn} - \frac{v_{dcn}}{L_{dcn}} \cdot \Delta(1-S_{mn}) \\ \frac{d\Delta v_{dcn}}{dt} = \frac{1-S_{mn}}{C_n} \cdot \Delta i_{dcn} - \frac{1}{C_n R_{dcn}} \cdot \Delta v_{dcn} + \frac{i_{dcn}}{C_n} \cdot \Delta(1-S_{mn}) + \\ \sum_{\varphi=a,b,c} \left(\frac{-i_{Ln\varphi}}{C_n} \cdot \Delta S_{wn\varphi} \right) + \sum_{\varphi=a,b,c} \left(\frac{-S_{wn\varphi}}{C_n} \cdot \Delta i_{Ln\varphi} \right) \end{cases} \quad (9)$$

交流侧:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_{gn\varphi}}{dt} = \frac{R_{dn}}{L_{gn}} \cdot \Delta i_{Ln\varphi} - \frac{R_n + R_{dn}}{L_{gn}} \cdot \Delta i_{gn\varphi} + \\ \frac{1}{L_{gn}} \cdot \Delta v_{cn\varphi} - \frac{1}{L_{gn}} \cdot \Delta v_{pcc\varphi} \\ \frac{d\Delta i_{Ln\varphi}}{dt} = \frac{R_{dn}}{L_n} \Delta i_{gn\varphi} - \frac{1}{L_n} \Delta v_{cn\varphi} + \frac{v_{dcn}}{L_n} \Delta S_{wn\varphi} + \\ \frac{S_{wn\varphi}}{L_n} \Delta v_{dcn} - \frac{R_n + R_{dn}}{L_n} \Delta i_{Ln\varphi} \\ \frac{d\Delta v_{cn\varphi}}{dt} = \frac{1}{C_{dn}} \cdot \Delta i_{Ln\varphi} - \frac{1}{C_{dn}} \cdot \Delta i_{gn\varphi} \end{cases} \quad (10)$$

2) 模拟单元的状态空间方程

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_{gt\varphi}}{dt} = \frac{R_{dt}}{L_{gt}} \cdot \Delta i_{Lt\varphi} - \frac{R_t + R_{dt}}{L_{gt}} \cdot \Delta i_{gt\varphi} + \\ \frac{1}{L_{gt}} \cdot \Delta v_{ct\varphi} - \frac{1}{L_{gt}} \cdot \Delta v_{pcc\varphi} \\ \frac{d\Delta i_{Lt\varphi}}{dt} = \frac{R_{dt}}{L_t} \cdot \Delta i_{gt\varphi} - \frac{R_t + R_{dt}}{L_t} \cdot \Delta i_{Lt\varphi} - \\ \frac{1}{L_t} \cdot \Delta v_{ct\varphi} + \frac{1}{L_t} \cdot \Delta v_{inv\varphi} \\ \frac{d\Delta v_{ct\varphi}}{dt} = \frac{1}{C_{dt}} \cdot \Delta i_{Lt\varphi} - \frac{1}{C_{dt}} \cdot \Delta i_{gt\varphi} \end{cases} \quad (11)$$

3) 交流系统及并网点状态空间方程

$$\begin{cases} \frac{d\Delta v_{pcc\varphi}}{dt} = -\frac{1}{C_{gt}} \cdot \Delta i_{gt\varphi} - \frac{1}{C_{g1}} \cdot \Delta i_{g1\varphi} - \dots - \\ \frac{1}{C_{gn}} \cdot \Delta i_{gn\varphi} + \frac{1}{C_s} \cdot \Delta i_{s\varphi} \\ \frac{d\Delta i_{s\varphi}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \cdot \Delta i_{s\varphi} + \frac{1}{L_s} \cdot \Delta v_{pcc\varphi} - \frac{1}{L_s} \cdot \Delta v_{s\varphi} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Δ 表示小信号扰动。上述状态方程组考虑了 n 个光伏单元、模拟单元和交流系统间的电气联系, 使各光伏单元的并网电流 i_{gn} 、模拟单元的并网电流 i_{gt} 以及并网总电流 i_s 可经状态变量 v_{pcc} 产生耦合, 从而准确反映光伏单元间的谐波耦合特性。

将式(9)一式(12)写为矩阵形式, 可得含 n 个光伏单元和 1 个模拟单元的并网系统三相 HSS 模型。对式中任一状态变量进行傅里叶展开可得 $2h+1$ 个谐波分量, 本文将其统称为一组状态变量, 则每个光伏单元、模拟单元和交流系统分别向模型引入 11、9、6 组状态变量。此时模型共含有 $11n+15$ 组状态变量, 模型规模过大不便进行后续计算分析。对此, 文献[20]基于相移特性, 提出一种将典型三相两电平变流器 HSS 模型转变为单相模型的降阶方法。本文借鉴此方法, 建立并网系统的单相 HSS 模型。

观察式(9)一式(12)的并网系统状态方程可知, 在假设系统三相对称的前提下, 交流侧的三相相互独立运行, 故以推导基于 a 相的降阶模型为例, 可直接省去仅含 b、c 相的方程, 并对式(9)进行三相解耦, 降阶模型只含有 $5n+5$ 组状态变量。定义相移矩阵 \mathbf{P} 、单位矩阵 \mathbf{F} 和零矩阵 \mathbf{Z} , 可得以下推演过程。

$$\begin{aligned} \Gamma[S_{wna}] \cdot i_{Lna} + \Gamma[S_{wnb}] \cdot i_{Lnb} + \Gamma[S_{wnc}] \cdot i_{Lnc} = \\ \Gamma[S_{wna}] \cdot i_{Lna} + \mathbf{P} \cdot \Gamma[S_{wna}] \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{P} \cdot i_{Lna} + \\ \mathbf{P}^2 \cdot \Gamma[S_{wna}] \cdot \mathbf{P}^{-2} \cdot \mathbf{P}^2 \cdot i_{Lna} = (\mathbf{F} + \mathbf{P} + \mathbf{P}^2) \cdot \\ \Gamma[S_{wna}] \cdot i_{Lna} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{P} = \text{diag}(\dots e^{-j\frac{4\pi}{3}} e^{-j\frac{2\pi}{3}} 1 e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{j\frac{4\pi}{3}} \dots) \quad (14)$$

降阶后的系统单相 HSS 模型如式(15)一式(19)所示。

$$\dot{\mathbf{X}} = (\Gamma[\mathbf{A}] - \mathbf{N}_{(5n+5) \times (2h+1)}) \cdot \mathbf{X} + \Gamma[\mathbf{B}] \cdot \mathbf{U} \quad (15)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_{AC} \ \mathbf{X}_{SIM} \ \mathbf{X}_{PVI} \ \dots \ \mathbf{X}_{PVn}]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}_{AC} \ \mathbf{U}_{SIM} \ \mathbf{U}_{PVI} \ \dots \ \mathbf{U}_{PVn}]^T \quad (17)$$

$$\Gamma[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{AC} & \mathbf{A}_{SIM}^C & \mathbf{A}_{PVI}^C & \dots & \mathbf{A}_{PVn}^C \\ \mathbf{A}_{SIM}^L & \mathbf{A}_{SIM} & \mathbf{Z} & \dots & \mathbf{Z} \\ \mathbf{A}_{PVI}^L & \mathbf{Z} & \mathbf{A}_{PVI} & \dots & \mathbf{Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{PVn}^L & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \dots & \mathbf{A}_{PVn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\Gamma[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{AC} & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \dots & \mathbf{Z} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{B}_{SIM} & \mathbf{Z} & \dots & \mathbf{Z} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \mathbf{B}_{PVI} & \dots & \mathbf{Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \dots & \mathbf{B}_{PVn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{X}_{AC} = [\Delta v_{pcc} \ \Delta i_s]$; $\mathbf{X}_{SIM} = [\Delta i_{Lt} \ \Delta v_{ct} \ \Delta i_{gt}]$; $\mathbf{X}_{PVn} = [\Delta i_{Ln} \ \Delta v_{cn} \ \Delta i_{gn} \ \Delta v_{dcn} \ \Delta i_{dcn}]$; $\mathbf{U}_{AC} = [\Delta v_g]$; $\mathbf{U}_{SIM} = [\Delta u_{inv}]$; $\mathbf{U}_{PVn} = [\Delta e_{dcn} \ \Delta(1-S_{mn}) \ \Delta S_{wn}]$; $\Gamma[\mathbf{A}]$ 、 $\Gamma[\mathbf{B}]$ 中的分块矩阵 \mathbf{A}_{AC} 、 \mathbf{A}_{SIM} 、 \mathbf{A}_{SIM}^C 、 \mathbf{A}_{SIM}^L 、 \mathbf{A}_{PVn} 、 \mathbf{A}_{PVn}^C 、 \mathbf{A}_{PVn}^L 、 \mathbf{B}_{AC} 、 \mathbf{B}_{SIM} 、 \mathbf{B}_{PVn} 及对角阵 $\mathbf{N}_{(5n+5) \times (2h+1)}$ 如附录 A 式(A3)一式(A13)所示。

本模型具备模块化与可扩展的优势。由式(18)和式(19)可知, 降阶后的并网系统单相 HSS 模型的矩阵 $\Gamma[\mathbf{A}]$ 、 $\Gamma[\mathbf{B}]$ 由多个分块矩阵组成。其中, 描述交流系统性质的分块矩阵 \mathbf{A}_{AC} 、 \mathbf{B}_{AC} 和模拟单元性质的分块矩阵 \mathbf{A}_{SIM} 、 \mathbf{A}_{SIM}^C 、 \mathbf{A}_{SIM}^L 、 \mathbf{B}_{SIM} 具有结构上的唯一性, 而描述光伏单元 n 性质的分块矩阵 \mathbf{A}_{PVn} 、 \mathbf{A}_{PVn}^C 、 \mathbf{A}_{PVn}^L 、 \mathbf{B}_{PVn} 在 n 取任何正整数时呈现出高度一致与可复用的结构特征, 此结构的重复性正是将本模型推广至含 n 个光伏单元的重要基础。此外, 本模型将并网公共母线电压 v_{pcc} 引入状态变量, 进而量化了光伏单元间以及交流系统与任一光伏单元间的电气联系, 在数学模型层面上建立了光伏单元、模拟单元和交流系统间的谐波耦合通道。

2.3 多光伏单元并网系统的谐波状态空间矩阵

结合式(8)和式(15), 参照线性定常系统传递函数的推导过程, 建立并网系统的谐波状态矩阵, 如式(20)所示。

$$\mathbf{H} = (\Gamma[\mathbf{A}] - \mathbf{N}_{(5n+5) \times (2h+1)})^{-1} \cdot \Gamma[\mathbf{B}] \quad (20)$$

谐波传递矩阵 \mathbf{H} 是一个 $(5n+5) \times (2h+1)$ 行、

$(3n+2) \times (2h+1)$ 列的分块矩阵。状态向量 \mathbf{X} 、输入向量 \mathbf{U} 和谐波传递矩阵间的关系如式(21)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_{AC} \\ \mathbf{X}_{SIM} \\ \mathbf{X}_{PVI} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{PVn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,1} & \mathbf{H}_{1,2} & \cdots & \mathbf{H}_{1,(3n+2)} \\ \mathbf{H}_{2,1} & \mathbf{H}_{2,2} & \cdots & \mathbf{H}_{2,(3n+2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{(5n+5),1} & \mathbf{H}_{(5n+5),2} & \cdots & \mathbf{H}_{(5n+5),(3n+2)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{AC} \\ \mathbf{U}_{SIM} \\ \mathbf{U}_{PVI} \\ \vdots \\ \mathbf{U}_{PVn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中： $\mathbf{H}_{1,2}$ 为向量 \mathbf{U} 中第 2 个子向量与向量 \mathbf{X} 中第 1 个子向量间的谐波耦合系数矩阵，矩阵 \mathbf{H} 中的其余元素同理。 $\mathbf{H}_{1,2}$ 中耦合系数的大小可以直观地反映 \mathbf{U} 矩阵中的第 2 个变量和 \mathbf{X} 矩阵中第 1 个变量间谐波耦合的交互强度：耦合系数增大意味着两变量的谐波间的耦合交互强度变强，反之亦然。

3 并网系统谐波耦合特性研究

3.1 并网系统谐波耦合分析

使用 MATLAB 运行式(15)数学模型，其电路参数的取值如表 1 所示。记录模型输出的式(21)中谐波耦合系数的数值，对大于 0.0001 的谐波耦合系数值绘制柱状图进行展示分析，如图 3 所示。

表 1 电路及控制参数值

Table 1 Circuit and control parameter values

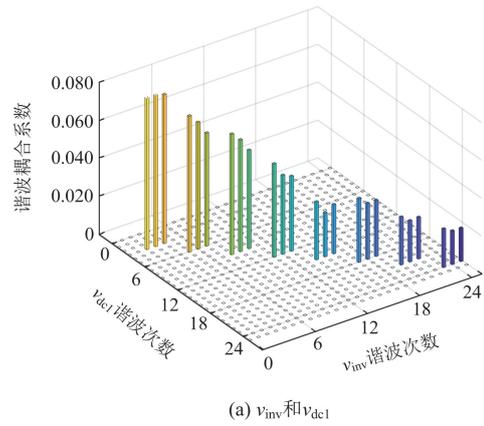
系统参数	取值	系统参数	取值
L_{dcr}/mH	3.9375	$R_{gr}, R_{gt}/\Omega$	0.2
R_{dcr}/Ω	10^{-6}	$L_{gr}, L_{gt}/\text{mH}$	2
$C_n/\mu\text{F}$	12.875	L_g/mH	3
$L_n, L_l/\text{mH}$	0.8	R_g/Ω	0.2
$R_n, R_l/\Omega$	0.2	m_a	15
$C_{dn}, C_{dl}/\mu\text{F}$	1000	m_f	0.8
$R_{dn}, R_{dl}/\Omega$	5	θ_0	0

1) 光伏单元间的谐波耦合特性

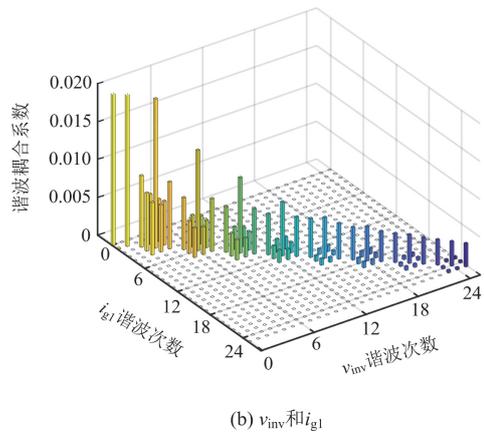
以模拟单元与光伏单元 1 为例研究单元间的谐波耦合特性。取 $h=25$ ，以柱状图形式绘制 v_{inv} 和 v_{dcl} 、 v_{inv} 和 i_{g1} 间的谐波耦合系数，如图 3 所示。图 3 中用不同颜色的柱体反映 v_{inv} 的任一次谐波与 v_{dcl} 、 i_{g1} 各次谐波间的耦合关系。

设 v_{inv} 中的 m 次零序(m 为 3 的倍数)、 $m+1$ 次正序和 $m-1$ 次负序谐波统称为第 m 阶谐波分量集，记为 v_{inv} 的第 m 阶谐波集。由图 3(a)可知， v_{inv} 的第 m 阶谐波集与 v_{dcl} 的 m 次零序谐波间存在谐波耦合关系；由图 3(b)可知， v_{inv} 的第 m 阶谐波集分别与 i_{g1} 的 m 次零序、 $m+1$ 次正序和 $m-1$ 次负序谐波

存在谐波耦合关系。



(a) v_{inv} 和 v_{dcl}



(b) v_{inv} 和 i_{g1}

图 3 v_{inv} 和 v_{dcl} 、 i_{g1} 间的谐波耦合程度示意图

Fig. 3 Harmonic coupling degree between v_{inv} and v_{dcl} , i_{g1}

图 4 描述了两光伏单元间谐波耦合的单次交互过程。首先，设模拟单元的逆变器交流侧电压 v_{inv} 中存在第 m 阶谐波集中的一次或多次谐波，这将向并网公共母线电压 v_{pcc} 中引入同频率谐波；随后， v_{pcc} 中的 m 次、 $m+1$ 次或 $m-1$ 次谐波电压会与其余光伏单元(如光伏单元 1)的逆变器直流侧电压 v_{dcl} 产生谐波耦合，在 v_{dcl} 中激发出 m 次谐波；最后， v_{dcl} 中的 m 次谐波再次与交流侧并网电流 i_{g1} 产生谐波耦合，在 i_{g1} 中激发出 m 次、 $m+1$ 次和 $m-1$ 次谐波。因此，并网系统对外表现出以下谐波耦合特性： v_{inv} 的第 m 阶谐波集中的任意次谐波都会在 i_{g1} 中激发出 m 次、 $m+1$ 次和 $m-1$ 次谐波。

2) 交流系统与任一光伏单元的谐波耦合特性

以光伏单元 1 为例研究交流系统背景谐波与任一光伏单元间的谐波耦合特性。取 $h=25$ ，以柱状图形式绘制 v_s 和 v_{dcl} 、 v_s 和 i_{g1} 间的谐波耦合系数矩阵如图 5 所示。图 5 中用不同颜色的柱体反映 v_s 的

任一次谐波与 v_{dc1} 、 i_{gl} 各次谐波间的耦合关系。

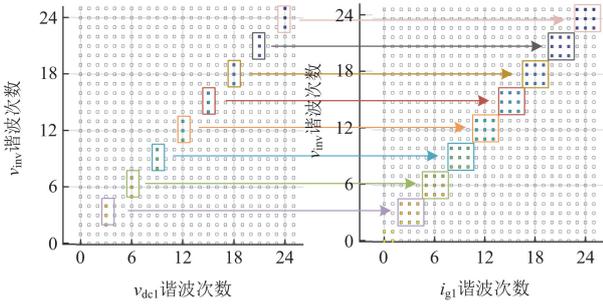


图4 v_{inv} 和 v_{dc1} 、 i_{gl} 间的谐波耦合特性分析图
Fig. 4 Analysis of harmonic coupling characteristics between v_{inv} and v_{dc1} , i_{gl}

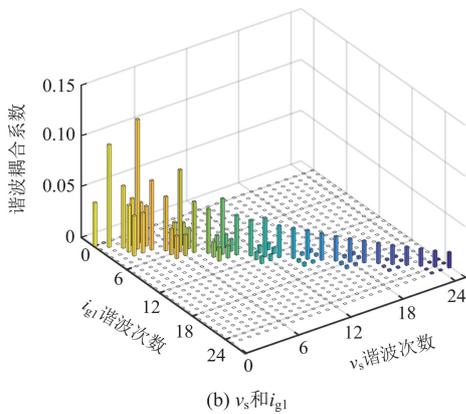
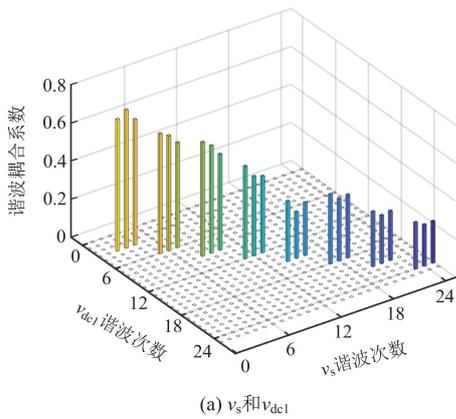


图5 v_s 和 v_{dc1} 、 i_{gl} 间的谐波耦合程度示意图
Fig. 5 Harmonic coupling degree between v_s and v_{dc1} , i_{gl}

同理将 v_s 中的 m 次零序、 $m+1$ 次正序和 $m-1$ 次负序谐波记为 v_s 的第 m 阶谐波集。由图 5(a)可知, v_s 的第 m 阶谐波集与 v_{dc1} 的 m 次零序谐波间存在谐波耦合关系; 由图 5(b)可知, v_s 的第 m 阶谐波集与 i_{gl} 的 m 次零序、 $m+1$ 次正序和 $m-1$ 次负序谐波间存在谐波耦合关系。

图 6 描述了交流侧背景谐波与任一光伏单元间

谐波耦合的单次交互过程。首先, 设交流系统电压 v_s 中存在第 m 阶谐波集中的一次或多次背景谐波, 这会向并网公共母线电压 v_{pcc} 中引入同次谐波; 随后, v_{pcc} 中的 m 次、 $m+1$ 次或 $m-1$ 次谐波和光伏单元中的逆变器直流侧电压 v_{dc1} 产生谐波耦合, 在 v_{dc1} 中激发 m 次谐波; 最后, v_{dc1} 中的 m 次谐波再次与交流侧并网电流 i_{gl} 产生谐波耦合, 在 i_{gl} 中激发出 m 次、 $m+1$ 次和 $m-1$ 次谐波。因此, 并网系统表现出以下谐波耦合特性: v_s 的第 m 阶谐波集中任意次背景谐波在 i_{gl} 中激发出 m 次、 $m+1$ 次和 $m-1$ 次谐波。

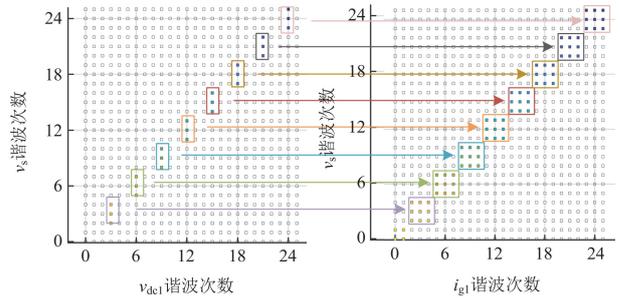


图6 v_s 和 v_{dc1} 、 i_{gl} 间的谐波耦合程度示意图
Fig. 6 Harmonic coupling degree between v_s and v_{dc1} , i_{gl}

3.2 并网系统谐波耦合特性总结

总结上述谐波耦合交互过程可发现, 大型光伏电站并网系统中谐波耦合的本质是变流器交流侧与直流侧间的谐波耦合, 这一结果的数学解释是 DC-AC 变流器的开关函数双边傅里叶系数构成的托普利兹矩阵的两条副对角线上的元素非零。截取 S_{wn} 的第 $-h$ 至 h 次双边傅里叶系数, 构成列向量并展开为 Toeplitz 矩阵 $\Gamma[S_{wn,h}]$ 。利用 MATLAB 程序计算 $\Gamma[S_{wn,h}]$ 并绘制柱形图如图 7 所示, 可见其副对角线元素非零且一致。

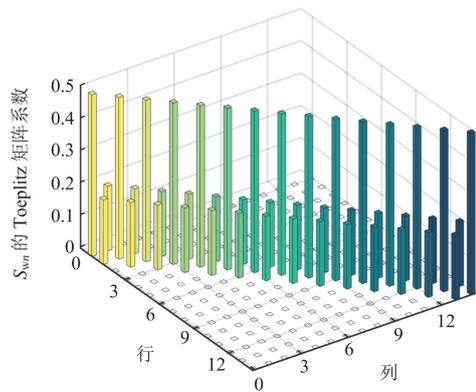


图7 逆变器开关函数 S_{wn} 傅里叶分析结果
Fig. 7 Fourier analysis results of inverter switch function S_{wn}

在大型光伏并网系统中，光伏单元间的谐波耦合交互过程和交流系统与光伏单元间的谐波耦合交互过程相似，它们都属于某一光伏单元外的谐波源以并网母线电压为媒介与该光伏单元产生的耦合现象。对于一个完整的、不导致并网系统脱离稳态的谐波交互过程，谐波源首先在公共并网母线电压中引入特定阶次的谐波分量，该谐波分量进一步与并网的光伏单元产生谐波交互过程。也正因如此，并网系统中的谐波耦合是一个多次重复的谐波交互过程。最终，随着重复次数的增加，谐波耦合在各个光伏单元中激发的谐波幅值最终趋于一个静态值，从而使系统对外部表现出静态的谐波耦合特性。

图 8 揭示了谐波耦合的交互过程。设交流侧 v_s 与模拟单元 v_{inv} 中含有第 m 阶谐波集内的一次或多次谐波，则它们将向公共并网母线电压 v_{pcc} 中引入同次谐波；随后， v_{pcc} 中的谐波将与所有光伏单元的逆变器直流侧电压产生谐波耦合，向 v_{dc1} 、 v_{dc2} 、 \dots 、 v_{dcn} 中引入 m 次谐波电压；进而，每一个光伏单元的直流侧电压 m 次谐波又将与本单元并网电流 i_{gn} 产生谐波耦合，在 i_{gn} 中激发出 m 次零序、 $m+1$ 次正序和 $m-1$ 次负序谐波；因此，每个光伏单元的并网电流会将第 m 阶谐波集的所有谐波再次引入公共并网母线电压 v_{pcc} ， v_{pcc} 中的谐波变化会再次启动上述谐波耦合过程，由此开始并网系统谐波耦合的递归。由于每轮递归经谐波耦合过程激发的新谐波幅值随递归次数逐次降低，故经过若干次迭代后，系统递归收敛并表现出静态的谐波耦合特性。

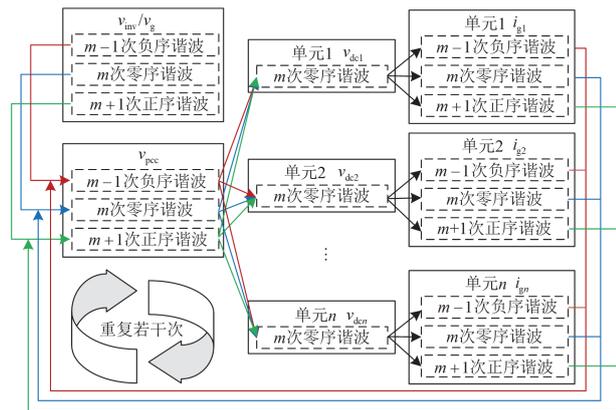


图 8 谐波耦合交互过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of harmonic coupling interaction process

3.3 电网强度对谐波耦合的影响

3.3.1 电网强度的量化

大型光伏电站的谐波耦合交互强度随电网强度的变化而变化。电网强度一般采用短路比表征^[25]。

$$S = \frac{V_s^2}{Z_s} \approx \frac{V_s^2}{X_s^2} \quad (22)$$

$$K_{SCR} = \frac{S}{P} \quad (23)$$

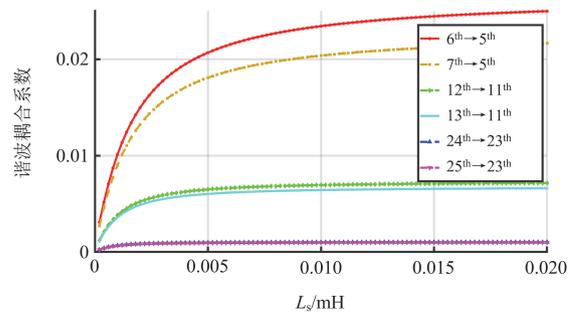
式中： S 为交流系统的短路容量； Z_s 为系统等效电抗； X_s 为系统等效电抗； P 为并网侧额定容量； V_s 为系统等效电压； K_{SCR} 为交流系统短路比。

由式(23)可知，交流系统的短路容量 S 下降会导致系统短路比降低，在实际中表现为选择电网强度较弱的交流系统运行方式；增加并网侧额定容量 P 也会导致系统短路比降低，在实际中表现为大型光伏电站的规模差异，如较大额定容量的光伏电站拥有较多的并联支路数。以下分别讨论上述两种情况对并网系统谐波耦合特性的影响。

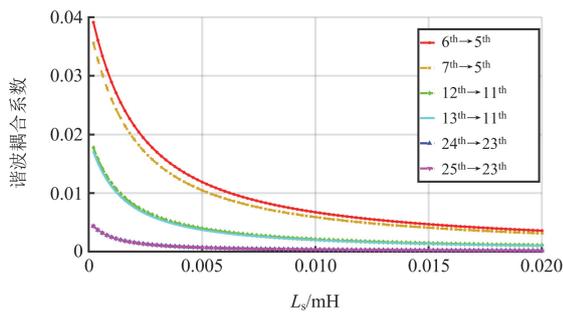
3.3.2 系统运行方式的变化对谐波耦合特性的影响

本文通过改变交流系统等效阻抗 Z_s 的取值来等效交流系统运行方式的变化。由式(22)可知，增大 Z_s 可以近似为增加等效电抗 X_s ，即增加等效电抗的电感值 L_s 。取多组 L_s 值，使用 MATLAB 对上述模型进行循环计算，获取一系列电网强度变化时的谐波耦合系数。设置 L_s 的初始值为 0.2 mH，每次计算将 L_s 的值提升 0.2 mH，循环计算 100 次。绘制图 3(b)所示光伏单元间 5—7 次、11—13 次、23—25 次谐波耦合系数随 L_s 变化的曲线，如图 9(a)所示；绘制图 5(b)所示交流系统与某一光伏单元间 5—7 次、11—13 次、23—25 次谐波耦合系数随 L_s 变化的曲线，如图 9(b)所示。图中的图例如“6th → 5th”代表某光伏单元产生 6 次谐波(或交流系统 6 次背景谐波)对另一光伏单元 5 次谐波的耦合作用。

由图 9 可知，当交流系统运行方式变化使交流系统强度下降时，光伏单元间的谐波耦合交互强度增强，但交流系统与任一光伏单元间的谐波耦合交互强度减弱。这是因为并网系统的谐波耦合交互强度主要取决于系统中各谐波源对并网母线电压的影响，当交流系统减弱时，一方面，交流系统对并网



(a) 光伏单元间谐波耦合



(b) 交流系统与任一光伏单元谐波耦合

图 9 系统谐波耦合交互强度随 L_s 变化示意图

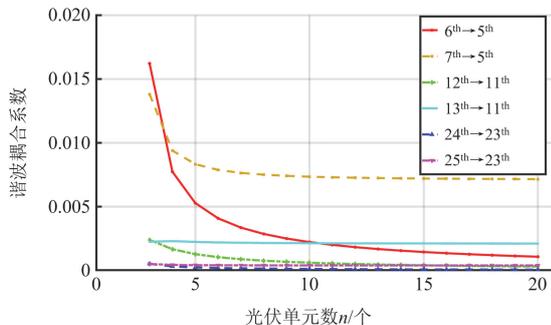
Fig. 9 Harmonic coupling interaction intensity varies with L_s

母线电压的支撑能力下降, 任一光伏单元的谐波对并网母线电压的影响力增大, 使光伏单元间的谐波耦合交互强度增强; 另一方面, 交流侧背景谐波对并网母线电压的影响力减小, 使交流系统与任一光伏单元之间的谐波耦合交互强度减弱。因此, 在实际运行中, 当光伏单元间可能出现较强的谐波交互作用时, 可考虑选用电网强度较大的运行方式以抑制谐波耦合的不良影响; 对于交流系统背景谐波与光伏单元间存在较强谐波交互作用的情况, 需考虑在交流系统中采取降低背景谐波电压的措施。

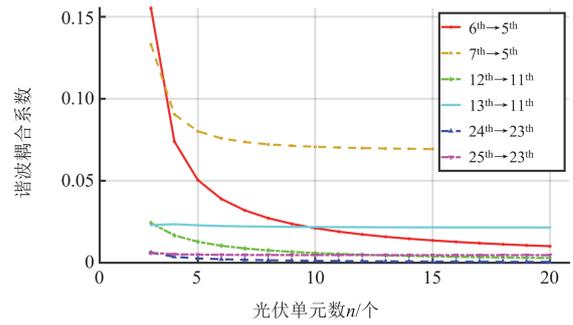
3.3.3 光伏电站规模的变化对谐波耦合特性的影响

本文通过增加光伏单元数提升光伏电站规模。取多组 n 值, 使用 MATLAB 对上述模型进行循环计算, 获取一系列电网强度变化时的谐波耦合系数。设置 n 初始值为 2, 每次计算将 n 值提升 1, 循环计算 19 次。绘制图 3(b)所示光伏单元间 5—7 次、11—13 次、23—25 次谐波耦合系数随 n 变化的曲线, 如图 10(a)所示; 绘制图 5(b)所示交流系统与光伏单元间 5—7 次、11—13 次、23—25 次谐波耦合系数随 n 变化的曲线, 如图 10(b)所示。

由图 10 可知, 当并网系统的光伏单元数增加时, 光伏单元之间以及任一光伏单元与交流系统间谐波耦合的交互强度都减弱。这是因为并网母线电压受所有光伏单元及交流电网共同影响, 当光伏单



(a) 光伏单元间谐波耦合



(b) 交流系统与任一光伏单元谐波耦合

图 10 系统谐波耦合交互强度随光伏单元数 n 变化示意图

Fig. 10 Harmonic coupling interaction intensity varies with n

元数增加时, 交流侧背景谐波和某一光伏单元的输出谐波对并网母线电压的影响力都相对减小, 从而导致光伏单元间、任一光伏单元与交流系统间的谐波耦合的交互强度减弱。

4 仿真验证

建立图 1 所示并网系统的 Simulink 时域仿真模型, 具体参数如表 1 所示。交流侧及模拟单元 2 的等效相电压基波最大值取 $v_g = v_{inv} = 380 \text{ V}$; 发电单元 1 逆变器电压外环控制取 380 V 。

4.1 耦合特性验证

选取光伏单元数 $n=1$, 保持所有电路拓扑的参数不变, 依次在模拟单元与交流侧无谐波电压、交流侧含基波 10% 的 11、23 次负序谐波电压、模拟单元含基波 10% 的 11、23 次负序谐波电压共 5 种运行状态下对系统进行仿真, 并在每次仿真结束后对并网单元 1 的并网电流进行 FFT 分析, 将其 11、13、23、25 次谐波幅值列于表 2 中。

表 2 交流侧/模拟单元谐波对单元 1 并网电流的影响

Table 2 Impact of AC side/analog unit harmonics on the grid-connected current of unit 1

	单元 1 并网电流幅值/A			
	11 次	13 次	23 次	25 次
交流侧/模拟单元无谐波	2.33	1.38	0.30	0.15
交流侧含 11 次谐波	8.54	4.15	—	—
交流侧含 23 次谐波	—	—	2.55	0.84
模拟单元含 11 次谐波	2.45	1.40	—	—
模拟单元含 23 次谐波	—	—	0.34	0.18

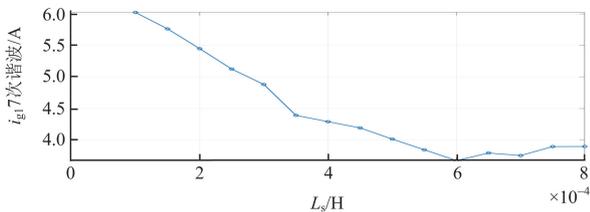
由表 2 可见, 在交流侧含 11 次背景谐波电压时, 单元 1 并网电流中的 11、13 次谐波幅值明显增大, 这说明交流侧 11 次谐波电压对并网电流的 11、13 次谐波确有激发作用, 同理交流侧 23 次背景谐波电压也对并网电流 23、25 次谐波有激发作用; 模拟单

元的仿真结果也得出相同结论，但模拟单元的激发作用相比交流侧微弱许多。以上结果与 3.1、3.2 节得出的谐波耦合特性一致。

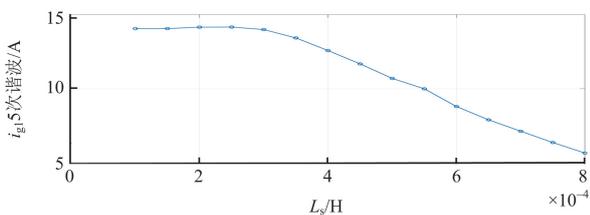
4.2 交流系统强度变化对耦合特性的影响验证

选取光伏单元数 $n=1$ ，保持所有电路拓扑的参数不变，依次设定电网含有基波电压 5% 的 5 次负序、7 次正序、11 次负序、23 次负序谐波电压，验证交流系统与单一光伏单元的谐波耦合交互强度受电网强度的影响。设置交流侧等效电抗的电感初始值为 0.1 mH，并逐次增加 0.05 mH，循环运行 15 次，并依次将光伏单元 1 的 7、5、13、25 次并网谐波电流幅值变化趋势绘制如图 11 所示。可见随着电网强度减弱，光伏单元并网电流中 7、5、13、25 次谐波的幅值呈下降趋势，这表明随着交流系统强度的减弱，交流系统与单一光伏单元间的谐波耦合交互强度也减弱，与 3.3 节中得出的结论一致。

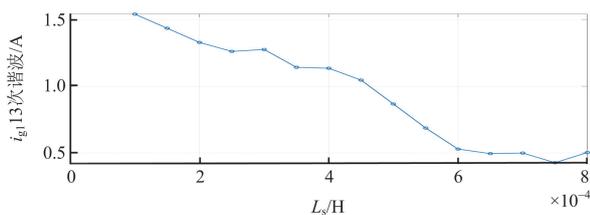
依次设定模拟单元仅含有基波电压 20% 的 11 次负序和 23 次负序谐波电压，验证光伏单元间的耦合特性受电网强度的影响。考虑到单元间耦合较为微弱，此处提升谐波比例以便清晰地反映谐波耦合特性。设置交流侧等效电抗的电感初始值为 0.1 mH，并逐次增加 0.05 mH，循环运行 15 次，并依次将光伏单元 1 的 13、25 次并网谐波电流幅值变化趋势绘制如图 12 所示。可见随着交流系统强度减



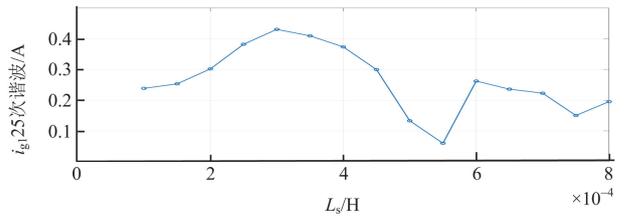
(a) 交流系统含5次背景谐波



(b) 交流系统含7次背景谐波



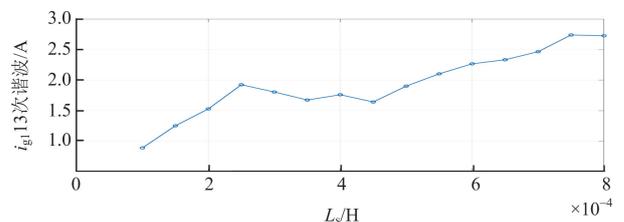
(c) 交流系统含11次背景谐波



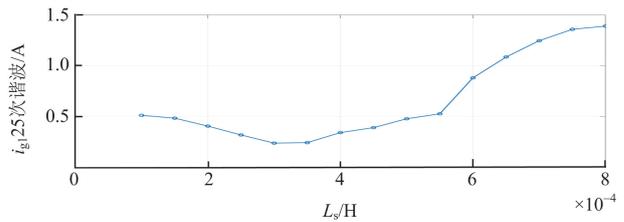
(d) 交流系统含23次背景谐波

图 11 电网强度对交流系统与任一光伏单元间谐波耦合特性影响验证

Fig. 11 Verification of the impact of grid strength on harmonic coupling characteristics between AC systems and any PV unit



(a) 模拟单元含11次背景谐波



(b) 模拟单元含23次背景谐波

图 12 电网强度对两光伏单元间谐波耦合特性影响验证

Fig. 12 Verification of the impact of grid strength on harmonic coupling characteristics between two PV units

弱时，光伏单元并网电流中 13、25 次谐波的幅值呈上升趋势，这表明随着交流系统强度减弱，光伏单元间耦合特性增强，与 3.3 节中得出的结论一致。

4.3 光伏并网规模变化对耦合特性的影响验证

保持交流系统强度、并网系统的电路拓扑参数等其余条件不变，改变光伏并网规模，进行多次仿真实验，验证光伏发电规模对谐波耦合特性的影响。

在光伏电站总单元数量 $n=1,2,\dots,5$ 条件下，验证交流系统对任一光伏单元的耦合特性受光伏并网规模的影响。依次在交流侧添加基波电压 5% 的 5、11、23 次负序谐波电压，记录任一光伏单元(以光伏单元 1 为例)并网电流 7、13、25 次谐波电流的幅值如表 3 所示。可见当光伏电站单元数上升时，光伏单元 1 的 7、13、25 次并网电流谐波幅值都呈下降趋势，即交流系统对光伏单元的耦合特性随光伏并网规模的增大而减弱，与 3.3 节中得出的结论

一致。

表 3 交流系统对光伏单元耦合特性受光伏并网规模的影响
Table 3 Impact of PV grid-connection scale on the coupling characteristics of PV units to the AC system

光伏单元数/个		1	2	3	4	5
谐波	7次(注入5次谐波)	6.89	6.86	6.82	6.77	6.71
电流	13次(注入11次谐波)	1.62	1.62	1.60	1.60	1.59
幅值/A	25次(注入23次谐波)	0.35	0.35	0.32	0.32	0.31

在光伏电站总单元数量 $n = 2, 3, \dots, 6$ 的条件下, 验证光伏单元间的耦合特性受光伏并网规模的影响。考虑到单元间耦合较为微弱, 为清晰地反映谐波耦合特性, 依次在模拟单元添加基波电压 10% 的 5 次、11 次、23 次负序谐波电压, 记录光伏单元 1 的并网电流 7 次、13 次、25 次谐波电流的幅值如表 4 所示。可见当光伏电站单元数上升时, 光伏单元 1 的 7 次、13 次、25 次并网电流谐波幅值都呈现下降趋势, 即交流系统对光伏单元的耦合特性随光伏并网规模的增大而减弱, 与 3.3 节中得出的结论一致。

表 4 光伏单元间耦合特性受光伏并网规模的影响

Table 4 Impact of PV grid connection scale on the coupling characteristics between PV units

光伏单元数/个		2	3	4	5	6
谐波	7次(注入5次谐波)	5.89	5.49	4.98	4.55	4.28
电流	13次(注入11次谐波)	1.37	1.21	1.13	1.09	0.53
幅值/A	25次(注入23次谐波)	0.31	0.20	0.19	0.14	0.04

5 结论

本文考虑光伏单元间的电气联系, 建立了模块化且可扩展至多个发电单元的大型光伏并网系统谐波状态空间数学模型。基于模型分析了并网系统的谐波耦合特性, 揭示了谐波耦合是一个以公共并网母线电压为媒介并多次重复的耦合过程。结合实际规划运行中的需求, 研究电网强度变化对不同规模的大型光伏电站并网系统谐波耦合特性的影响, 结果表明并网系统谐波耦合的交互强度主要由谐波源对并网公共母线电压的影响程度决定。研究方法及相关问题的分析及应对具有参考价值。

附录 A

开关函数的傅里叶展开形式如式(A1)和式(A2)所示。

$$S_w(t) = \frac{1}{2} + \frac{m_a}{2} \sin(\omega_0 t + \theta_0) + \frac{2}{\pi} (X_0 + Y_0) \quad (\text{A1})$$

$$\left\{ \begin{aligned} X_0 &= \sum_{m_0=1,3,5}^{\infty} \sum_{n_0=0,\pm 2,\pm 4,\dots} \frac{B\left(n_0, \frac{m_0 m_a \pi}{2}\right)}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{m_0 \pi}{2}\right) \cdot \cos(m_0 m_f \omega_0 t + n_0(\omega_0 t + \theta_0)) \\ Y_0 &= \sum_{m_0=2,4,6}^{\infty} \sum_{n_0=\pm 1,\pm 3,\pm 5,\dots} \frac{B\left(n_0, \frac{m_0 m_a \pi}{2}\right)}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{m_0 \pi}{2}\right) \cdot \sin(m_0 m_f \omega_0 t + n_0(\omega_0 t + \theta_0)) \end{aligned} \right. \quad (\text{A2})$$

式中: m_a 为调制指数; m_f 为载波比; θ_0 为调制波的初始相位; m_0 为载波谐波阶次; n_0 为调制波谐波阶次; $B(\cdot)$ 为第一类贝塞尔函数。

式(12)一式(16)所示系统单相 HSS 模型中, $\Gamma[A]$ 、 $\Gamma[B]$ 中的分块矩阵 A_{AC} 、 A_{SIM} 、 A_{SIM}^C 、 A_{SIM}^L 、 A_{PVn} 、 A_{PVn}^C 、 A_{PVn}^L 、 B_{AC} 、 B_{SIM} 、 B_{PVn} 及对角阵 $N_{(5n+5) \times (2h+1)}$ 如下所示, 其中 A_{AC} 、 B_{AC} 由交流系统参数决定; A_{SIM} 、 A_{SIM}^L 、 A_{SIM}^C 、 B_{SIM} 由模拟单元参数决定; A_{PVn} 、 A_{PVn}^L 、 A_{PVn}^C 、 B_{PVn} 由光伏单元 n 的参数决定。

$$B_{AC} = \left[\begin{array}{c} Z_{2h+1} \\ -\frac{1}{L_g} \cdot I_{2h+1} \end{array} \right]^T \quad (\text{A3})$$

式中: Z_{2h+1} 表示 $(2h+1) \times (2h+1)$ 零矩阵, 其中 h 表示模型研究的最高谐波次数; I_{2h+1} 表示单位矩阵。

$$B_{SIM} = \left[\begin{array}{c} \frac{1}{L_t} \cdot I_{2h+1} \\ Z_{2h+1} \\ Z_{2h+1} \end{array} \right]^T \quad (\text{A4})$$

$$B_{PVn} = \left[\begin{array}{c} Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \quad -\frac{\Gamma[v_{dcn}]}{L_n} \cdot I_{2h+1} \\ Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \\ Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \\ Z_{2h+1} \quad \frac{\Gamma[i_{dcn}]}{C_n} \cdot I_{2h+1} \quad -\frac{\Gamma[i_{cno}]}{C_n} \cdot I_{2h+1} \\ \frac{1}{L_{dcn}} \cdot I_{2h+1} \quad \frac{\Gamma[v_{dcn}]}{L_{dcn}} \cdot I_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \end{array} \right] \quad (\text{A5})$$

$$A_{AC} = \left[\begin{array}{c} Z_{2h+1} \quad \frac{1}{C_g} \cdot I_{2h+1} \\ \frac{1}{L_g} \cdot I_{2h+1} \quad -\frac{R_g}{L_g} \cdot I_{2h+1} \end{array} \right] \quad (\text{A6})$$

$$A_{SIM}^L = \left[\begin{array}{c} Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \quad -\frac{1}{L_{gt}} \cdot I_{2h+1} \\ Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \quad Z_{2h+1} \end{array} \right]^T \quad (\text{A7})$$

$$A_{\text{SIM}}^{\text{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & -\frac{1}{C_g} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} \\ \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \end{bmatrix} \quad (\text{A8})$$

$$A_{\text{SIM}} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{\text{Lt}}+R_{\text{dt}}}{L_t} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & -\frac{1}{L_t} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \frac{R_{\text{dt}}}{L_t} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} \\ \frac{1}{C_{\text{dt}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & -\frac{1}{C_{\text{dt}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} \\ \frac{R_{\text{dt}}}{L_{\text{gt}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \frac{1}{L_{\text{gt}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & -\frac{R_{\text{gt}}+R_{\text{dt}}}{L_{\text{gt}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} \end{bmatrix} \quad (\text{A9})$$

$$A_{\text{PVn}}^{\text{L}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & -\frac{1}{L_{\text{gn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \\ \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \end{bmatrix}^{\text{T}} \quad (\text{A10})$$

$$A_{\text{PVn}}^{\text{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & -\frac{1}{C_g} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \\ \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \end{bmatrix} \quad (\text{A11})$$

$$A_{\text{PVn}} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{\text{Ln}}+R_{\text{dn}}}{L_n} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & -\frac{1}{L_n} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \frac{R_{\text{dn}}}{L_n} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \frac{\Gamma[S_{\text{wna}}]}{L_n} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \\ \frac{1}{C_{\text{dn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & -\frac{1}{C_{\text{dn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \\ \frac{R_{\text{dn}}}{L_{\text{gn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \frac{1}{L_{\text{gn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & -\frac{R_{\text{gn}}+R_{\text{dn}}}{L_{\text{gn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \\ -\frac{\Gamma[S_{\text{wna}}] \cdot (\mathbf{F} + \mathbf{P} + \mathbf{P}^2)}{C_n} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & -\frac{1}{C_n \cdot R_{\text{dcn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \frac{\Gamma[1-S_{\text{mn}}]}{C_n} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} \\ \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} & -\frac{\Gamma[1-S_{\text{mn}}]}{L_{\text{dcn}}} \cdot \mathbf{I}_{2h+1} & \mathbf{Z}_{2h+1} \end{bmatrix} \quad (\text{A12})$$

$$N_{(5n+5) \times (2h+1)} = \text{diag}(-j(5n+5) \times (2h+1)\omega_0 \cdots -j\omega_0 \quad 1 \quad j\omega_0 \cdots j(5n+5) \times (2h+1)\omega_0) \quad (\text{A13})$$

参考文献

- [1] 莫维科, 雷剑雄, 陈亦平, 等. 典型独立同步电网新能源高渗透率运行中的频率稳定挑战与应对措施(上)[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(16): 177-187.
MO Weike, LEI Jianxiong, CHEN Yiping, et al. Frequency stability challenges and countermeasures in typical isolated synchronous power grids with high penetration of renewable energy (part I)[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(16): 177-187.
- [2] 莫维科, 叶恺, 陈亦平, 等. 典型独立同步电网新能源高渗透率运行中的频率稳定挑战与应对措施(下)[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(18): 178-187.
MO Weike, LEI Jianxiong, CHEN Yiping, et al. Frequency stability challenges and countermeasures in typical isolated synchronous power grids with high penetration of renewable energy(part II)[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(18): 178-187.
- [3] YANG Zhe, WANG Hongyi, LIAO Wenlong, et al. Protection challenges and solutions for AC systems with renewable energy sources: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(1): 18-39.
- [4] 王亚军, 王继东, 曹曼, 等. 光伏电站理论发电功率的优化计算模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 144-153.
WANG Yajun, WANG Jidong, CAO Man, et al. Optimization calculation models and methods for the theoretical power of a photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 144-153.
- [5] 王驰中, 高鑫, 陈衡, 等. 分布式光伏电站投资决策及经济性分析[J]. 发电技术, 2025, 46(3): 607-616.
WANG Chizhong, GAO Xin, CHEN Heng, et al. Power generation technology[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(3): 607-616.
- [6] 杜文娟, 郝向坤, 陈珏. 光伏场经柔直并网振荡稳定性分析与抑制方法研究[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 2-11, 51.
DU Wenjuan, HAO Xiangkun, CHEN Jue. Oscillation stability analysis and mitigation method of photovoltaic field connected to the grid via VSC-HVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 2-11, 51.
- [7] 周柯, 金庆忍, 莫枝阅, 等. 虚拟同步机并网运行下电网谐波抑制和故障穿越策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 166-173.
ZHOU Ke, JIN Qingren, MO Zhiyue, et al. Grid harmonic suppression and fault ride-through strategies for a virtual synchronous generator in grid-connected operation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 166-173.
- [8] WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [9] 韩平平, 林子豪, 夏雨, 等. 大型光伏电站等值建模综

- 述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 39-47.
- HAN Pingping, LIN Zihao, XIA Yu, et al. Review on equivalent modeling of large-scale photovoltaic power plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(4): 39-47.
- [10] 陈思源, 景巍巍, 史明明, 等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 162-175.
- CHEN Siyuan, JING Weiwei, SHI Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 162-175.
- [11] 陈新, 王赞程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094.
- CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.
- [12] MIDDLEBROOK R D, CUK S. A general unified approach to modelling switching-converter power stages[C] // 1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 8-10, 1976, Cleveland, OH, USA: 18-34.
- [13] AHDAMI J, EMAADI A, BELLAR M D, et al. Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1997, 44(8): 767-770.
- [14] ADITYA K, WILLIAMSON S. Simplified mathematical modelling of phase-shift controlled series-series compensated inductive power transfer system[C] // 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), June 8-10, 2016, Santa Clara, USA: 842-848.
- [15] TANG J Q, DONG S, CUI C, et al. Sampled-data modeling for wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 3173-3182.
- [16] LOVE G N, WOOD A R. Small signal model of a power electronic converter[C] // 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), December 3-6, 2007, Singapore, Singapore: 636-642.
- [17] KWON J B, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Harmonic instability analysis of a single-phase grid-connected converter using a harmonic state space modeling method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4188-4200.
- [18] 王晋宁, 王磊, 韩肖清, 等. 基于谐波状态空间建模的变换器交直流谐波耦合特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 159-167.
- WANG Jinning, WANG Lei, HAN Xiaoqing, et al. Analysis on AC/DC harmonic coupling characteristics of converter based on harmonic state space modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 159-167.
- [19] 张国荣, 徐晨林, 蔡智斌, 等. 基于谐波状态空间的变换器建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 141-147.
- ZHANG Guorong, XU Chenlin, CAI Zhibin, et al. A modeling method for a converter based on harmonic state space[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 141-147.
- [20] 高凯. 基于谐波状态空间的三相并网逆变器建模及稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- GAO Kai. Research on modeling and stability of three-phase grid-connected inverter based on harmonic state space[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [21] 林顺富, 李寅, 戴焯敏, 等. 考虑谐波耦合的多变流器并网系统建模及交直流谐波交互特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 65-77.
- LIN Shunfu, LI Yin, DAI Yemin, et al. Modeling of a multiple grid-connected-converter system considering harmonic coupling and analysis of AC/DC harmonic interaction characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 65-77.
- [22] 万钰锡, 李寅, 林顺富. 基于谐波状态空间多变流器并网系统建模及稳定性分析[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 4-14.
- WAN Yuxi, LI Yin, LIN Shunfu. Modeling and stability analysis of multiple grid-connected-converter system based on harmonic state space[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 4-14.
- [23] KWON J B, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Harmonic interaction analysis in a grid-connected converter using harmonic state-space (HSS) modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6823-6835.
- [24] 林顺富, 戴焯敏, 颜昕昱, 等. 基于谐波状态空间理论的LCL型并网逆变器谐波交互及稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 76-83.
- LIN Shunfu, DAI Yemin, YAN Xinyu, et al. Analysis on harmonic interaction and stability of LCL grid-connected inverter based on harmonic state space theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 76-83.
- [25] 于琳, 孙华东, 赵兵, 等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 919-929.
- YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 919-929.

收稿日期: 2025-07-19; 修回日期: 2025-12-15

作者简介:

洪嘉乐(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波特性及稳定性分析; E-mail: jlhong@whu.edu.cn

石晶(1969—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行可靠性分析; E-mail: shi.jing@whu.edu.cn

陈红坤(1967—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析. E-mail: chkinsz@163.com

(编辑 张颖)