

跟网型逆变电源多回路耦合失稳机制分析

周一辰, 徐宏伟, 李永刚, 张艺菲, 王子杰, 李金泽

(河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003)

Analysis of Multi-loop Coupling Instability Mechanism for Grid-connected Inverter Power Supply

ZHOU Yichen, XU Hongwei, LI Yonggang, ZHANG Yifei, WANG Zijie, LI Jinze

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province (North China Electric Power University),
Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The coupling among internal circuits within the control system of the grid-connected inverter power supply is intricate. When the system is unstable due to parameter influences, the specific loops affected by instability parameters and the mechanism of interaction between loops are not clear. Based on this, this paper proposes a chimeric torque method suitable for analyzing the power supply of grid-connected inverters, elucidating the mechanism of multi-loop coupling instability in the system under parameter influence. Firstly, the algebraic differential equation models for each control link of the grid-connected inverter power supply are established. Simultaneously, a state space model transformation method is proposed for the phase-locked loop to form a second-order differential equation structure suitable for torque analysis. Secondly, the chimeric torque topology of the reserved loop structure is established, and a calculation formula for the damping torque provided by each loop of the grid-connected inverter power supply is derived. Then, the theory of mutual excitation and competition between grid-connected inverter power supply circuits is proposed, along with the introduction of a design parameter influence circuit tracing method. Finally, the path of mutual excitation and competition between circuits under the influence of key parameters is traced, and the multi-loop coupling instability mechanism of the inverter is revealed.

KEY WORDS: grid-connected inverter power supply; multi-loop coupling; torque-chimeric method; tracing path; mutual excitation competition; instability mechanism

摘要: 跟网型逆变电源控制系统内部回路间耦合复杂, 参数影响导致系统失稳时, 失稳参数影响的具体回路以及回路间作用机制尚不清楚。基于此, 该文提出适用于分析跟网型逆变电源的嵌合转矩法, 揭示参数影响下系统多回路耦合失稳机制。首先, 建立跟网型逆变电源各控制环节代数微分方程模型, 同时, 提出锁相环状态空间模型变换方法, 形成适用于转矩分析法的2阶微分方程结构; 其次, 建立保留回路结构的嵌合转矩拓扑图, 推导跟网型逆变电源各回路所提供阻尼转矩的计算公式; 然后, 提出跟网型逆变电源回路间互激、竞争理论, 设计参数影响回路溯源方法; 最后, 溯源关键参数影响下的回路间互激、竞争路径, 揭示逆变电源多回路耦合的失稳机制。

关键词: 跟网型逆变电源; 多回路耦合; 嵌合转矩法; 溯源路径; 互激竞争; 失稳机制

0 引言

近年来, 随着中国能源发展战略的调整, 传统的化石能源正逐渐向可再生能源转型^[1-2]。可再生能源通常通过跟网型并网逆变器连接到电网^[3]。然而, 逆变器不同控制模块间路径耦合复杂, 参数影响导致系统失稳时, 失稳参数影响的具体回路以及回路间作用机制尚不清楚, 威胁着电力系统安全稳定运行^[4]。因此, 有必要研究各控制环的交互作用, 深入揭示系统多回路耦合失稳机制, 为优化逆变电源并网稳定运行提供理论支撑。

目前, 常用的并网逆变器稳定性分析方法主要包括模态分析法^[5-10]、阻抗分析法^[11-20]、阻尼转矩法^[21-23]。模态分析法能够提供振荡频率、阻尼比、参与因子等信息, 并根据特征值分布情况判断系统稳定性。文献^[5-7]使用特征值轨迹分析跟网型逆变器控制系统参数变化对系统稳定性的影响规

基金项目: 国家自然科学基金项目(62303183); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022MS067)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (62303183); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022MS067).

律。但是，特征值分析方法是一种数值计算方法，缺乏明确的物理意义，只能从表象上分析系统稳定性变化规律，难以揭示逆变器并网失稳模式成因及阻尼特性变化机制^[8]。

阻抗分析法主要采用阻抗等效模型分析系统的各个子系统，进而使用阻抗稳定性判据分析系统稳定性。文献[11]基于阻抗分析法，分析了锁相环与电网阻抗的耦合性问题，结果表明，电网阻抗和锁相环带宽的增加会导致锁相环与电网阻抗之间的耦合性增强，从而降低系统的稳定性；文献[12]利用阻抗稳定性判据，分析了功率变化与系统稳定性之间的交互作用；文献[13]采用阻抗稳定性判据，研究了交流电网与变换器之间的相互作用。阻抗分析法物理意义清晰，可以从工程角度直观理解系统的动态过程。然而，仅通过分析设备的外部阻抗特性，难以揭示系统内部不同回路间的交互耦合作用和参数影响传递路径等物理过程^[19]。

阻尼转矩法主要是将阻尼转矩在功角-角速度空间进行分解，通过阻尼转矩系数大小判断系统稳定性。文献[21]基于阻尼转矩法详细分析了虚拟同步机中不同参数对系统阻尼转矩系数的影响规律，阐明了虚拟同步控制策略对小干扰稳定的影响机制；文献[22]从阻尼转矩角度分析了光伏发电系统阻尼成因，得出系统等效阻尼系数和等效同步系数及各状态变量间的耦合关系决定了模式性质的结论；文献[23]通过阻尼转矩法，识别了电网强度和锁相环(phase locked loop, PLL)参数等作用机制。阻尼转矩分析方法从阻尼转矩角度出发，具有清晰的物理意义，能够从本质上揭示系统失稳机制^[24]，但在涉及多环节回路的阻尼竞争等交互作用机制方面尚未有有效的理论方法。由于跟网型逆变电源控制系统内部回路耦合复杂，有多条反馈回路，传统阻尼转矩法所构建的传递函数框图中各关键环节所包含支路相互交错，无法快速准确地定位各关键环节所有支路。此外，传统阻尼转矩法不具备保留结构特性，无法直观反映系统内部的反馈回路结构，缺乏开展关键回路间阻尼互激、竞争作用机制分析的结构基础。

上述分析方法具有自身的特点与优势，可用于分析系统的稳定性，但在揭示参数影响在系统各环节中的传递过程和各环节之间的耦合关系方面尚有不足。

文献[4]提出一种路径级数展开方法。该方法描述了设备内部相互作用路径与系统稳定性的直观关系，能够定位影响系统稳定性的主导作用路径，从而有助于更好地理解系统不稳定现象的物理机制。然而，该方法在路径级数展开时进行了近似处理，忽略了路径级数展开后的高阶项，使得分析结果可能存在误差。

基于此，本文提出适用于分析跟网型逆变电源的嵌合转矩法，开展跟网型逆变电源互激、竞争多回路耦合失稳机制分析。本文的主要贡献和创新点如下：

- 1) 提出锁相环状态空间模型变换方法，能够构建适用于转矩分析法的 2 阶微分方程结构。
- 2) 基于嵌合转矩法，建立嵌合转矩模型，能够清晰展现出控制系统各环节的耦合关系，可揭示失稳参数影响在各环节的传播路径。
- 3) 推导回路提供的阻尼转矩计算公式，能够计算各个回路的阻尼转矩贡献量，该方法下的各回路阻尼转矩表达式精确、无忽略因素、无误差。
- 4) 建立回路间的互激、竞争作用理论，能够揭示参数影响下系统内部多回路间的阻尼竞争、互激失稳机制。

1 跟网型逆变电源并网系统控制结构

将图 1 所示跟网型逆变电源并网系统^[25]划分为锁相环模块、外环模块、电流环模块及滤波模块，线性化建模各个模块，各环节的线性化微分方程见附录 A。

该系统包含 PI 控制参数、线路滤波参数等，系统的稳定性与这些参数密切相关。受天气、环境因素影响，逆变电源波动频繁，系统控制参数难免超出其稳定范围，易导致系统失稳。以有功功率波动为例，当其发生波动时，易导致系统出现振荡失稳问题，如图 2 所示。

而且，系统失稳时，无法直接确定具体的影响参数。此外，图 1 系统各控制模块回路间耦合复杂，一个参数影响多个回路。系统失稳时，失稳参数影响的具体回路以及回路间作用机制不清楚。

因此，下文旨在厘清系统各回路间的耦合关系，准确溯源导致系统失稳的关键影响参数和路径，揭示参数影响下回路间耦合的失稳机制。

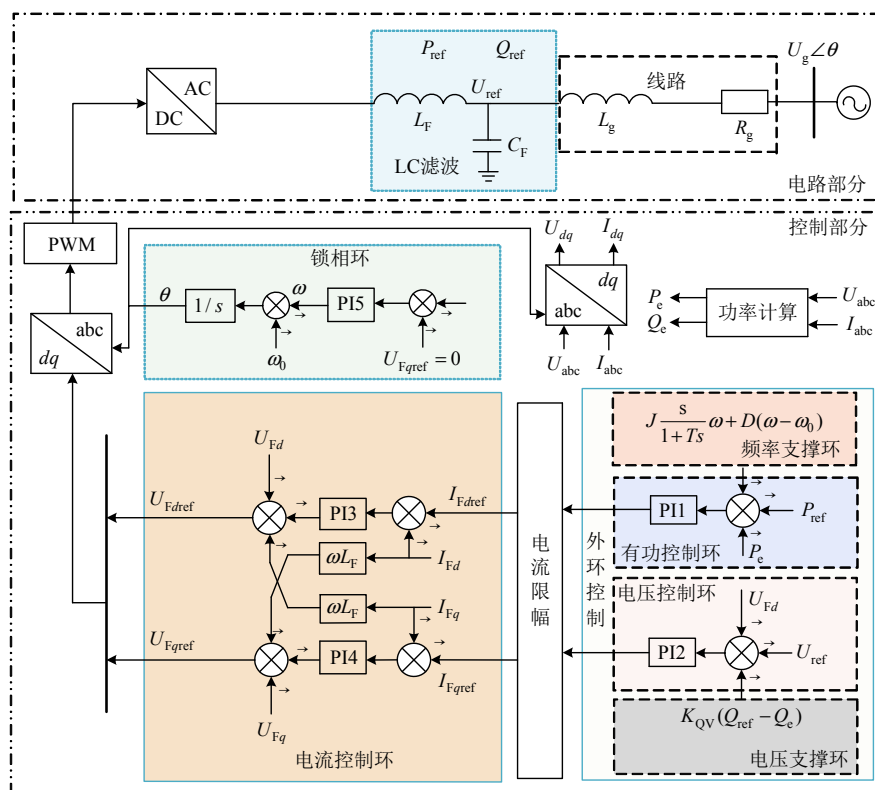


Fig. 1 Structure of grid-connected inverter power supply system

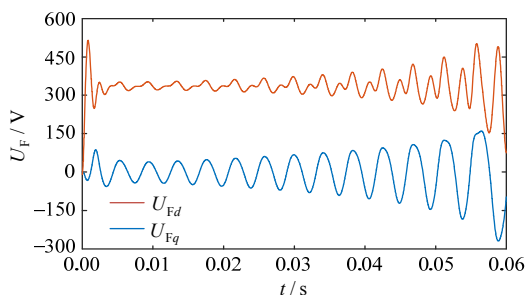


Fig. 2 Oscillation instability diagram

2.1 保留回路结构的嵌合回路拓扑模型

本节建立系统各个模块间的整体联系图,并构建保结构嵌合回路模型。首先,构建前向通道模型以及反馈回路模型;然后建立反馈回路与前向通道之间的联系;最后,构建系统嵌合回路拓扑模型。

选择锁相环模块为前向通道, 该模块的非线性空间模型可被描述为

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = s(K_{p5} + \frac{1}{s}K_{i5})U_{Fq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为锁相环角频率; θ 为锁相环相角; K_{p5} 、

K_{i5} 分别为锁相环 PI 控制比例系数、积分系数; U_{Fq} 为并网电压 q 轴分量。

但是, 如果直接采用式(1)的形式作为前向通道, 则不符合阻尼转矩分析法的结构要求。这是因为: 阻尼转矩分析法是借助于抑制发电机的阻尼转矩而提出的, 该转矩源于转速 ω 的动态微分方程。相应地, 在图 3(a)中展示发电机前向通道中存在 2 阶微分方程结构。然而, 在锁相环中不存在该结构, 如图 3(b)所示。

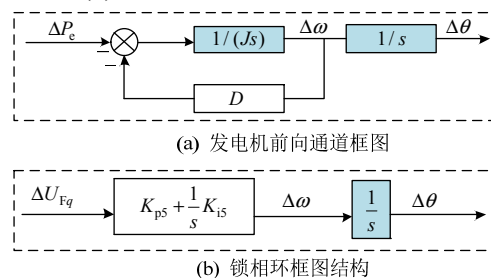


Fig. 3 Comparison of forward channels

因此, 本文变换锁相环微分方程, 构造满足阻尼转矩分析法的 2 阶微分方程结构。将滤波模块方程 $sU_{Fq} = \frac{1}{C_F}(I_{Fq} - I_{gq}) - \omega U_{Fd}$ 代入式(1), 可得:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_{p5} \left[\frac{1}{C_F} (I_{Fq} - I_{gq}) - \omega U_{Fd} \right] + K_{i5} U_{Fq} \quad (2)$$

式中：\$C_F\$ 为滤波器电容；\$I_{Fq}\$ 为并网电流在 \$q\$ 轴上的分量；\$I_{gq}\$ 为输电线路电流在 \$q\$ 轴上的分量。

基于此，可以构建如下状态空间模型：

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = K_{p5}[\frac{1}{C_F}(I_{Fq} - I_{gq}) - \omega U_{Fd}] + K_{i5}U_{Fq} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)所描述的状态空间模型具备 2 阶微分方程结构，符合阻尼转矩分析法对前向通道的基本形式要求。因此，后文将采用式(3)为前向通道，开展阻尼转矩分析。基于式(3)，线性化建模得到图 4 所示的 2 阶前向通道框图模型。

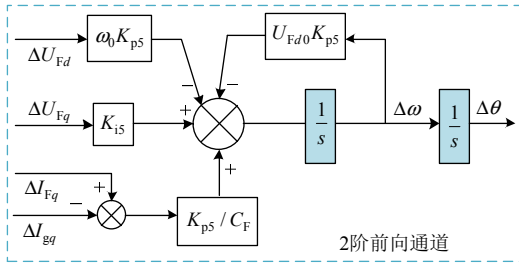


图 4 锁相环前向通道

Fig. 4 forward channel of PLL

2) 反馈回路模型。

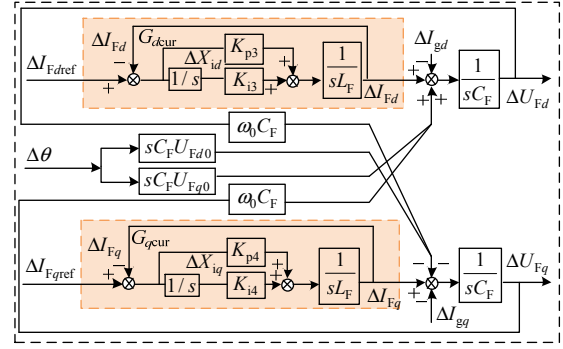
合并电流环方程与滤波器方程，可消除部分耦合项，简化级联模块。此外，二者串联合并后输出为状态变量，便于表示其他变量以求解反馈系数。因此，串联电流环模块和滤波模块，依据电流滤波环线性化微分代数方程，最终形成电流滤波模块串联结构，如图 5(a)所示。同样，得到外环模块的线性化传递函数框图，如图 5(b)所示。

进一步处理反馈模块，建立反馈回路与前向通道的联系。具体地，图 5 中外环模块输出是电流滤波模块的输入，二者可串联简化反馈模块。此外，处理反馈模块，使其输出变量展现出前向通道的输入变量，对应的反馈模块框图如图 6 所示。图中，\$G_{dvol}\$、\$G_{qvol}\$、\$G_{dcur}\$、\$G_{qcur}\$ 的详细公式见附录 B。

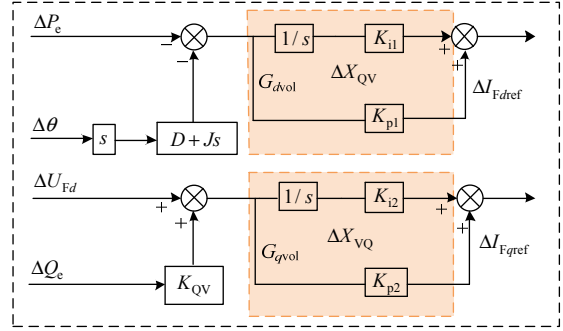
3) 嵌合回路拓扑模型。

建立系统各个模块间反馈联系须确定反馈系数，因此，有必要定量计算反馈系数。具体地，用状态变量表示其他变量，提取系数定量计算。

系统中逆变器的输出电压增量 \$\Delta U_{Fd}\$、\$\Delta U_{Fq}\$ 以及锁相环相角增量 \$\Delta \theta\$ 为状态变量。逆变器输出功率增量 \$\Delta P_e\$、\$\Delta Q_e\$ 及线路电流增量 \$\Delta I_{gd}\$、\$\Delta I_{gq}\$ 用状态变量表示如下：



(a) 电流滤波模块



(b) 外环模块

图 5 模块框图

Fig. 5 Block diagram

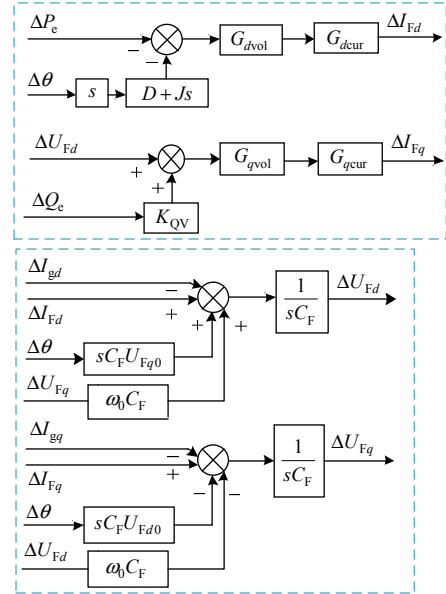


图 6 反馈模块框图

Fig. 6 Block diagram of the feedback module

$$\begin{cases} \Delta P_e = a_1 \Delta U_{Fd} + a_2 \Delta U_{Fq} + a_3 \Delta \theta \\ \Delta Q_e = b_1 \Delta U_{Fd} + b_2 \Delta U_{Fq} + b_3 \Delta \theta \\ \Delta I_{gd} = c_1 \Delta U_{Fd} + c_2 \Delta U_{Fq} + c_3 \Delta \theta \\ \Delta I_{gq} = d_1 \Delta U_{Fd} + d_2 \Delta U_{Fq} + d_3 \Delta \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中反馈系数的值见附录 C。

通过对反馈系数定量计算，最终形成以图 4 构建的 2 阶锁相环模块作为前向通道、图 6 作为反馈回路的全系统反馈联系图，如图 7 所示。

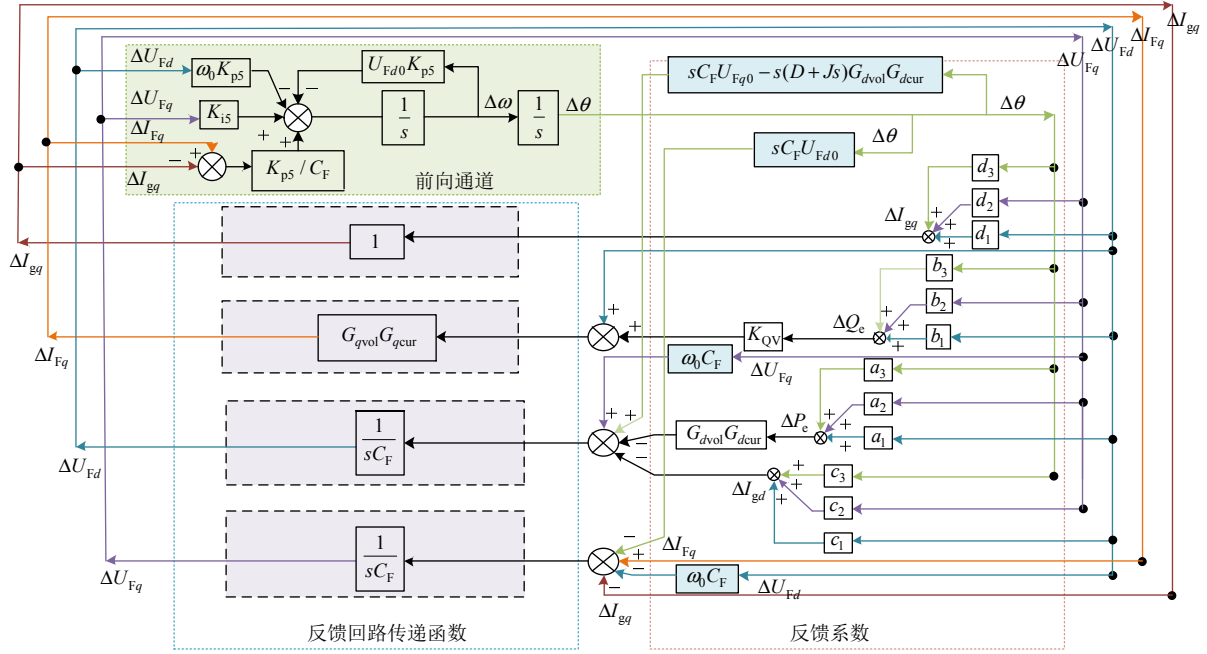


图7 模块整体联系图

Fig. 7 Module overall contact diagram

图7中前向通道区域传递函数用 G_θ 表示; 反馈回路区域传递函数分别用 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 表示; 回路间互反馈系数分别用 $G_{\theta id}$ 、 $G_{\theta iq}$ 、 $G_{u diq}$ 、表示,

其详细公式见附录B。

整合化简图7得到图8以 ΔU_{Fd} 、 ΔU_{Fq} 、 ΔI_{gq} 、 ΔI_{gd} 为前向通道的嵌合回路模型。

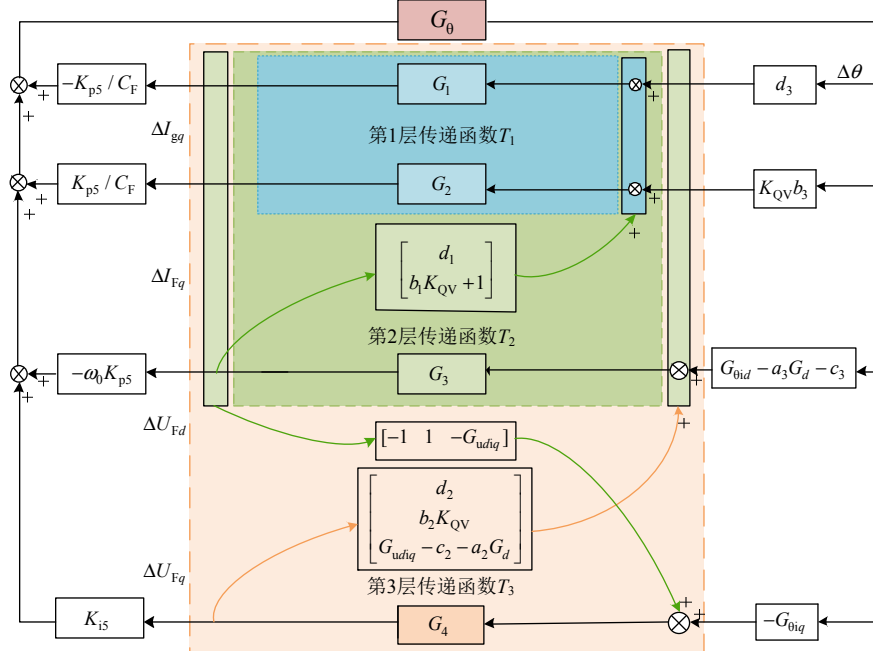


图8 嵌合回路拓扑图

Fig. 8 Topology diagram of chimeric loop

本文方法构建的嵌合回路拓扑图能够清晰展现跟网型逆变电源控制系统回路间耦合关系, 对溯源造成系统失稳的关键影响回路以及揭示回路间相互作用机制具有重要意义。

2.2 回路阻尼转矩计算

本节基于嵌合转矩法计算系统各回路提供的

阻尼转矩。嵌合转矩法^[26]的实现步骤可概括为: 首先, 定义 1、2 条相邻回路为第 1 层子框图, 利用梅逊公式求得第 1 层子框图的传递函数; 其次, 嵌合第 3 条回路到第 1 层回路, 将其定义为第 2 层子框图。依此类推, 这样由下向上逐层嵌合, 利用梅逊公式最终可求得全系统所有回路的传递函数, 进

而计算出所有回路提供的阻尼转矩。

针对图 8，首先选取 G_1 、 G_2 回路，将其定义为第 1 层子框图，计算得到传递函数矩阵 T_1 如下：

$$T_1 = \frac{\begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix}}{M_1} \quad (5)$$

式中： $M_1=1$ ； G_1 为第 1 条直通回路组成的传递函数； G_2 为第 2 条直通回路组成的传递函数。

其次，选取图 8 中 G_3 回路和第 1 层子框图，将其定义为第 2 层子框图，计算得到传递函数矩阵 T_2 为

$$T_2 = \frac{\begin{bmatrix} M_2 T_1 & T_1 \begin{bmatrix} d_1 \\ b_1 K_{QV} + 1 \end{bmatrix} G_3 \\ 0 & G_3 \end{bmatrix}}{M_2} \quad (6)$$

式中： $M_2=1$ ； $M_2 T_1$ 为第 1 层直通回路组成的传递函数； $T_1 \begin{bmatrix} d_1 \\ b_1 K_{QV} + 1 \end{bmatrix} G_3$ 为第 3 条回路到第 1 层旁通回路组成的传递函数； G_3 为第 2 层回路中第 3 条直通回路组成的传递函数。

最后，选取图 8 中 G_4 回路和第 2 层子框图，将其定义为第 3 层子框图，计算得到传递函数矩阵 T_3 为

$$T_3 = \frac{\begin{bmatrix} M_3 T_2 + T_2 K_2 G_4 K_1 T_2 & T_2 K_2 G_4 \\ G_4 K_1 T_2 & G_4 \end{bmatrix}}{M_3} \quad (7)$$

式中： $K_2=[d_2 \quad b_2 K_{QV} \quad G_{udiq}-c_2-a_2 G_d]^T$ ； $K_1=[-1 \quad 1 \quad -G_{udiq}]$ ； $M_3=1-G_4 K_1 T_2 K_2$ ； $M_3 T_2+T_2 K_2 G_4 K_1 T_2$ 为第 2 层直通回路组成的传递函数； $G_4 K_1 T_2$ 为第 2 层回路到第 4 条旁通回路组成的传递函数； $T_2 K_2 G_4$ 为第 4 条回路到第 2 层旁通回路组成的传递函数； G_4 为第 3 层回路中第 4 条直通回路组成的传递函数。

前向通道的输出 $\Delta\theta$ 通过反馈系数 d_3 、 $K_{QV}b_3$ 、 $G_{\theta id}-a_3 G_d-c_3$ 、 $-G_{\theta iq}$ 、 $-K_{p5}/C_F$ 、 K_{p5}/C_F 、 $-\omega_0 K_{p5}$ 、 K_{i5} 和回路间传递函数 T_3 反馈至前向通道的输入 ΔU_{Fd} 、 ΔU_{Fq} 、 ΔI_{Fq} 、 ΔI_{gq} ，由此求出总传递函数：

$$T = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p5}}{C_F} & \frac{K_{p5}}{C_F} & -\omega_0 K_{p5} & K_{i5} \end{bmatrix} T_3 \begin{bmatrix} d_3 \\ K_{QV}b_3 \\ G_{\theta id}-a_3 G_d-c_3 \\ -G_{\theta iq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

总阻尼转矩为 T 在 $\Delta\omega$ 方向的分量为

$$D_{\text{total}} = -\text{Im}(T) / \omega \quad (9)$$

式中 $\text{Im}(\cdot)$ 为取虚部运算。

3 基于嵌合转矩模型的稳定分析

3.1 互激、竞争理论

将式(8)所示总传递函数进一步处理为

$$T = \frac{1}{1-G_4 K_1 T_2 K_2} \begin{bmatrix} C_3(M_3 T_2 + T_2 K_2 G_4 K_1 T_2) C_1 & C_3 T_2 K_2 G_4 C_2 \\ C_4 G_4 K_1 T_2 C_1 & C_4 G_4 C_2 \end{bmatrix} = \frac{1-\overline{G_4 K_1 T_2 K_2}}{|1-G_4 K_1 T_2 K_2|^2} \begin{bmatrix} C_3(M_3 T_2 + T_2 K_2 G_4 K_1 T_2) C_1 & C_3 T_2 K_2 G_4 C_2 \\ C_4 G_4 K_1 T_2 C_1 & C_4 G_4 C_2 \end{bmatrix}$$

式中： $C_1=[d_3 \quad K_{QV} b_3 \quad G_{\theta id}-a_3 G_d-c_3]^T$ ； $C_3=[-K_{p5}/C_F \quad K_{p5}/C_F \quad -\omega_0 K_{p5}]$ ； $C_4=K_{i5}$ ； $C_2=-G_{\theta iq}$ 。

求其阻尼转矩分量，化简得到回路互激、竞争公式：

$$T_D = \begin{bmatrix} T_{D11} & T_{D12} \\ T_{D21} & T_{D22} \end{bmatrix} = -\text{Im} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} / \omega \quad (10)$$

将式(10)互激、竞争公式按项分解，可得到第 4 条回路与第 2 层回路间所有路径的阻尼转矩解析表达式：

$$\begin{cases} T_{D111} = -\text{Im}(C_3(M_3 T_2 + T_2 K_2 G_4 K_1 T_2) C_1) / (|M_3|^2 \omega) \\ T_{D112} = -\text{Im}(-\overline{G_4 K_1 T_2 K_2} C_3(M_3 T_2 + T_2 K_2 G_4 K_1 T_2) C_1) / (|M_3|^2 \omega) \\ T_{D121} = -\text{Im}(C_3 T_2 K_2 G_4 C_2) / (|M_3|^2 \omega) \\ T_{D122} = -\text{Im}(-\overline{G_4 K_1 T_2 K_2} C_3 T_2 K_2 G_4 C_2) / (|M_3|^2 \omega) \\ T_{D211} = -\text{Im}(C_4 G_4 K_1 T_2 C_1) / (|M_3|^2 \omega) \\ T_{D212} = -\text{Im}(-\overline{G_4 K_1 T_2 K_2} C_4 G_4 K_1 T_2 C_1) / (|M_3|^2 \omega) \\ T_{D221} = -\text{Im}(C_4 G_4 C_2) / (|M_3|^2 \omega) \\ T_{D222} = -\text{Im}(-\overline{G_4 K_1 T_2 K_2} C_4 G_4 C_2) / (|M_3|^2 \omega) \end{cases} \quad (11)$$

式中： T_{D11} 的第 1 项 T_{D111} 、 T_{D22} 的第 1 项 T_{D221} 分别为第 2 层直通回路、第 4 条直通回路提供的阻尼转矩； T_{D12} 的第 1 项 T_{D121} 、 T_{D21} 的第 1 项 T_{D211} 分别为第 4 条回路经第 2 层回路形成的旁通回路提供的阻尼转矩以及第 2 层回路经第 4 条回路形成的旁通回路提供的阻尼转矩； T_{D11} 的第 2 项 T_{D112} 、 T_{D22} 的第 2 项 T_{D222} 分别为第 2 层直通回路借第 4 条回路提供的互借直通阻尼转矩和第 4 条直通回路借第 2 层回路提供的互借直通阻尼转矩； T_{D12} 的第 2 项 T_{D122} 、 T_{D21} 的第 2 项 T_{D212} 分别为第 4 条回路借第 2 层回路提供的互借旁通阻尼转矩以及第 2 层回路借第 4 条回路提供的互借旁通阻尼转矩。各

项含有不同参数，参数变化会导致各项阻尼转矩发生变化。

根据参数影响下阻尼转矩分量变化趋势的相同或相反能够判断对应回路间互激、竞争关系。当阻尼转矩分量变化趋势相同时，二者构成回路互激关系。当阻尼转矩分量变化趋势相反时，二者构成回路竞争关系。回路间互激、竞争结果转矩为正时，则为良性互激、竞争回路；反之为恶性互激、竞争回路，不利于系统稳定。

性互激、竞争回路，不利于系统稳定。

式(11)各项对应路径中都包含第 2 层回路，而第 2 层回路内又包含不同类型路径，参数作用具体路径不明，需溯源关键作用路径。

3.2 影响参数作用回路溯源

系统中包含多条路径，不同路径对应的传递函数如图 9 所示。本节进一步设计影响系统稳定运行性的关键参数对应回路溯源算法。

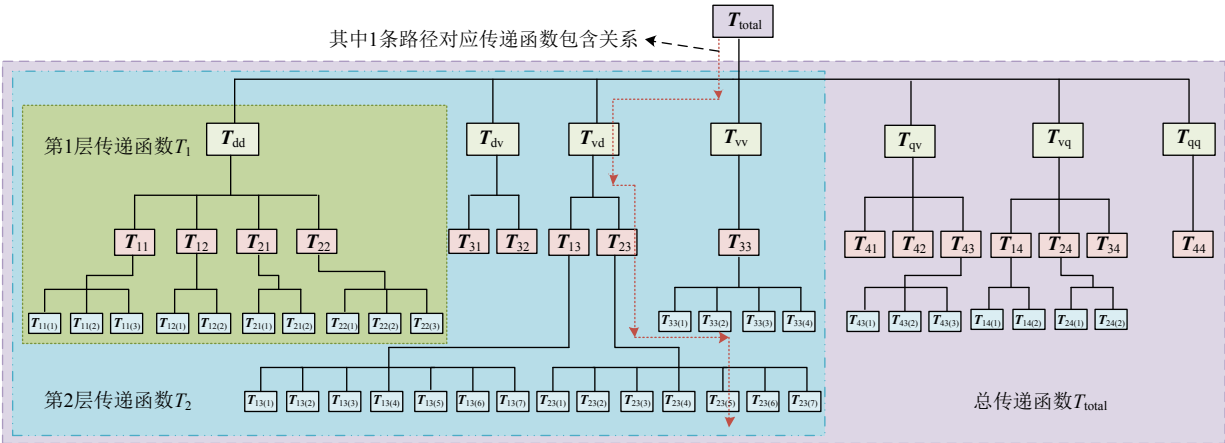


图 9 不同路径对应的传递函数图

Fig. 9 Block diagram of the transfer function corresponding to different paths

参数影响下，计算各回路提供的阻尼转矩大小，溯源参数影响下的关键作用回路。当系统在稳定运行工况下，某一参数按某方向变化，总阻尼转矩由正转为负时，则定义该参数为失稳参数。图 9 中 $T_{total}=T_{dd}+T_{dv}+T_{vd}+T_{vv}+T_{qv}+T_{vq}+T_{qq}$ 。其中： T_{dd} 为 1、2 两条回路组成的传递函数； T_{dv} 为第 1 层回路与第 3 条回路组成的传递函数； T_{vd} 为第 3 条回路与第 1 层回路组成的传递函数； T_{vv} 为第 3 条直通回路传递函数； T_{qv} 为第 2 层回路与第 4 条回路组成的传递函数； T_{vq} 为第 4 条回路与第 2 层回路组成的传递函数； T_{qq} 为第 4 条直通回路传递函数。当总阻尼转矩变化时，首先，计算失稳参数影响下图 9 第 2 行 T_{dd} 、 T_{dv} 、 T_{vd} 、 T_{vv} 、 T_{qv} 、 T_{vq} 、 T_{qq} 各项对应回路提供的阻尼转矩，找到变化最大的阻尼转矩分量；然后，拆分此关键分量各项，对应图 9 中第 3 行各项所在回路提供的阻尼转矩，找出与此关键分量变化性质相同的变化最大的阻尼转矩分量；最后，若该分量对应路径不明则按此方法继续向下溯源到第 4、5 行传递函数对应路径，即可确定失稳参数影响下的最终路径。图 9 中虚线为其中一条路径对应的溯源过程。

本文方法能够清晰展现跟网型逆变电源控制系统中的所有路径，准确溯源到失稳参数影响的关

键回路，能够找到造成系统失稳的根本原因。

4 算例分析

为验证所提出的嵌合转矩法的准确性，本文溯源影响系统稳定性的关键参数，分析参数失稳临界点并揭示关键参数影响下系统多回路耦合失稳机制。

采用图 1 所示的跟网型逆变电源并网系统来测试本文方法。设计电流内环带宽约为电压外环带宽的 5.6 倍，满足带宽设计原则，系统参数设置如表 1 所示。在该组参数下计算系统各模式特征值、振荡频率、阻尼比，所得结果如表 2 所示。

表 1 控制系统参数

Table 1 Parameters of control system

参数	数值/pu	参数	数值/pu
J	0.016 1	K_{i1}	0.121 0
D	0.160 7	K_{p2}	1.210 0
P	0.833 3	K_{i2}	1.210 0
L_F	0.026 0	K_{p3}	0.413 2
C_F	0.190 1	K_{i3}	1.652 9
R	0.082 6	K_{p4}	0.008 3
L_g	0.000 8	K_{i4}	0.008 3
K_{QV}	0.001 0	K_{p5}	15.556 0
K_{p1}	1.210 0	K_{i5}	6 222.500 0

表 2 系统各模式主要参数

Table 2 Main parameters of each mode of the system

特征根实部	特征根虚部	频率/Hz	阻尼比	参与环节
-3 334.160 00	27 498.500 0	4 376.520 0	0.120 40	LC 滤波
-1 911.160 00	0	0	1	LC 滤波
-160.154 00	0	0	1	LC 滤波
-6.210 82	65.014 9	10.347 4	0.095 10	锁相环
-4.000 05	0	0	1	电流环
-0.098 06	0	0	1	电压环
-0.574 16	0	0	1	电压环
-1.000 06	0	0	1	电压环
-1.010 07	0	0	1	电流环

由表 2 可看出，特征值实部全部为负，系统在该组参数下是稳定的。进一步采用该组参数搭建仿真模型，并网电流波形如图 10 所示。可看出，系统在该组参数下能够稳定运行。

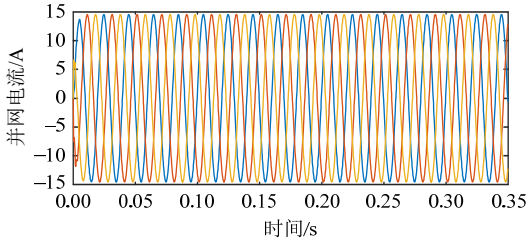


图 10 并网电流波形图

Fig. 10 Waveform of grid-connected current

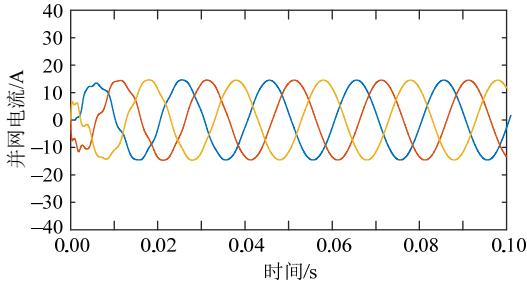
4.1 控制系统关键影响参数

跟网型逆变电源系统包含多个参数，在不合理的参数配置下，容易导致系统失稳，但又无法直接确定具体的影响参数。因此，须溯源失稳关键影响参数。

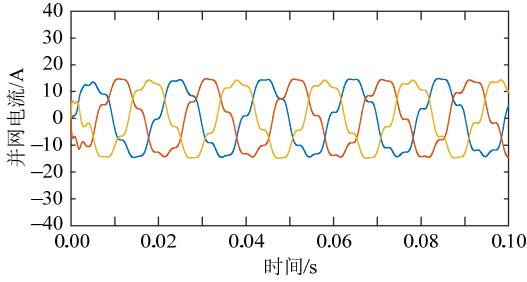
在表 1 所设定的系统稳定运行工况参数下，只改变某一参数值，其他参数保持不变，通过计算特征值实部、分析参与模式发现，影响锁相环模式导致系统失稳的参数有电压环积分系数 K_{i2} 、有功功率 P 。同时可确定 K_{i2} 的临界点为 72.6 pu，增大会导致锁相环失稳； P 临界点为 0.85 pu，增大也会引起锁相环失稳。

为验证分析的准确性，以参数 K_{i2} 为例，设定仿真时间为 0.1 s，保持其他参数不变，分别取 K_{i2} 为 1、72.6、80 pu，进行仿真，观察并网电流波形的变化，仿真结果如图 11 所示。可看出， K_{i2} 由 72.6 pu 变到 80 pu，系统逐渐从稳定状态转变为失稳状态，验证了上文分析关键影响参数的准确性。

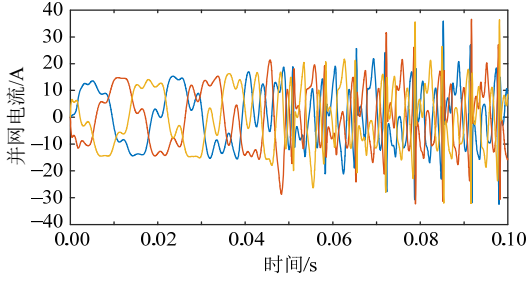
通过溯源影响系统稳定性参数和分析参数失稳临界点表明： K_{i2} 提高、 P 上升会导致锁相环模式失稳，不利于系统稳定。下文基于嵌合转矩法进一



(a) $K_{i2}=1$ pu



(b) $K_{i2}=72.6$ pu



(c) $K_{i2}=80$ pu

图 11 K_{i2} 变化下并网电流波形图

Fig. 11 Waveform diagram of grid-connected current under K_{i2} changes

步溯源 K_{i2} 、 P 关键作用回路，揭示多回路耦合失稳机制。

4.2 准确性验证

为验证嵌合转矩法的准确性，以 K_{i2} 为例，利用根轨迹、阻尼转矩曲线分别分析 K_{i2} 造成系统失稳的临界点。图 12 展示了 K_{i2} 取 1~120 pu 的特征值轨迹，图 13 为 K_{i2} 取 1~120 pu 时总阻尼转矩变化曲线。

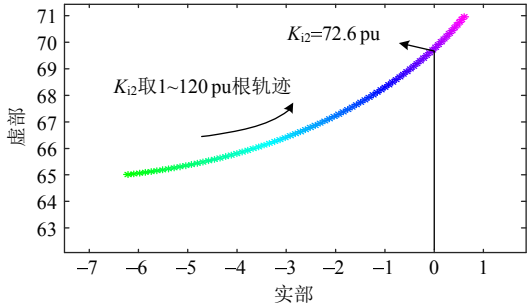
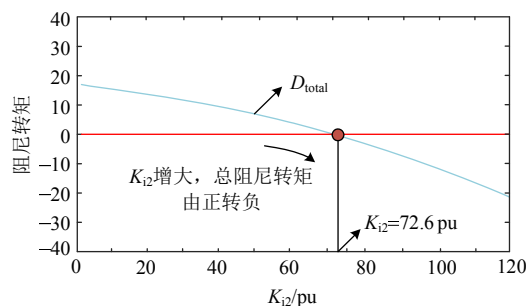


图 12 K_{i2} 取 1~120 pu 时的根轨迹

Fig. 12 Root locus when $K_{i2}=1\sim120$ pu

由图 12 可得，当 $K_{i2}>72.6$ pu 时，特征根的实部呈现正值，并且根轨迹向着正实部方向移动，系

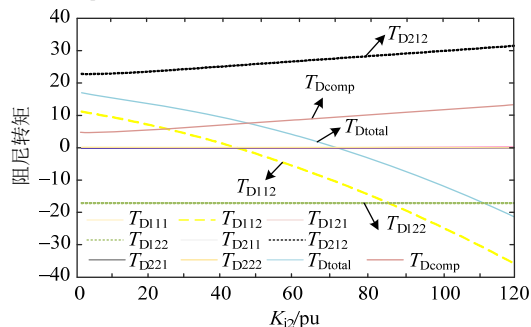
图13 总阻尼转矩随 K_{12} 变化曲线Fig. 13 Curve of total damping torque varies with K_{12}

统失稳。根据图13可得,随着 K_{12} 增加,系统总阻尼转矩由正变为负,系统变得不稳定。 $K_{12}=72.6$ pu时,总阻尼转矩为0。由此可得, K_{12} 影响下总阻尼转矩由正转负的临界点为72.6 pu。总阻尼转矩曲线分析的临界点与根轨迹分析结果一致,验证了嵌合转矩分析方法的准确性,适用于探究跟网型逆变电源系统内部多回路间的耦合失稳机制。

4.3 失稳机制分析

1) 回路竞争。

本节进一步溯源参数 K_{12} 关键作用回路,揭示多回路耦合失稳机制。采用互激、竞争公式(10),计算 K_{12} 取1~120 pu时,各个回路提供的阻尼转矩,得到图14中8个阻尼转矩分量、1个回路竞争阻尼转矩(T_{Dcomp})以及1个总阻尼转矩。

图14 K_{12} 影响下各阻尼转矩分量变化曲线Fig. 14 Variation curves of each damping torque component under the influence of K_{12}

由图14可见:随着 K_{12} 变化, T_{D212} 、 T_{D122} 所在回路向系统提供的阻尼转矩性质及变化趋势相反,构成回路阻尼竞争关系。 T_{D112} 所在回路向系统提供更多的负阻尼转矩,不利于系统稳定。

分析 T_{D212} 、 T_{D122} 所对应的竞争回路, T_{D212} 为第2层回路借第4条回路提供的互借旁通阻尼转矩, T_{D122} 为第4条回路借第2层回路提供的互借旁通阻尼转矩。由于两条竞争回路都流经第2层回路,而第2层回路内包含多个路径,须溯源竞争回路在第2层内的具体流经路径。

K_{12} 取1~120 pu,即系统从稳定变化到失稳情况下,绘制出第2层内阻尼转矩分量 D_{dd} 、 D_{dv} 、 D_{vd} 和 D_{vv} 的变化曲线,如图15所示。

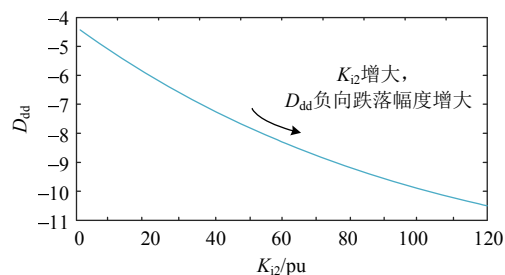
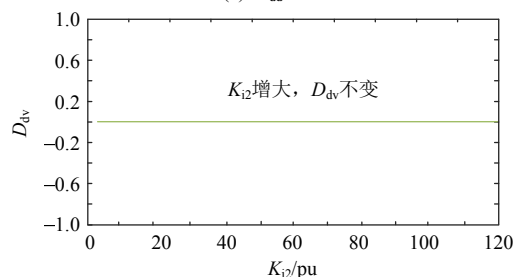
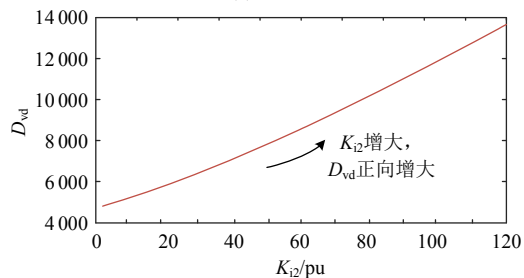
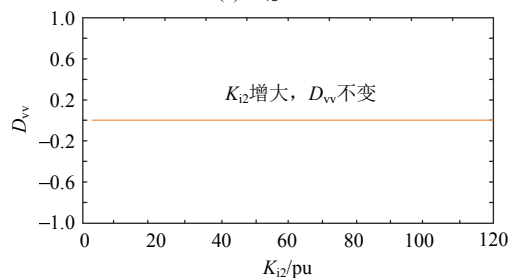
(a) D_{dd} 变化曲线(b) D_{dv} 变化曲线(c) D_{vd} 变化曲线(d) D_{vv} 变化曲线

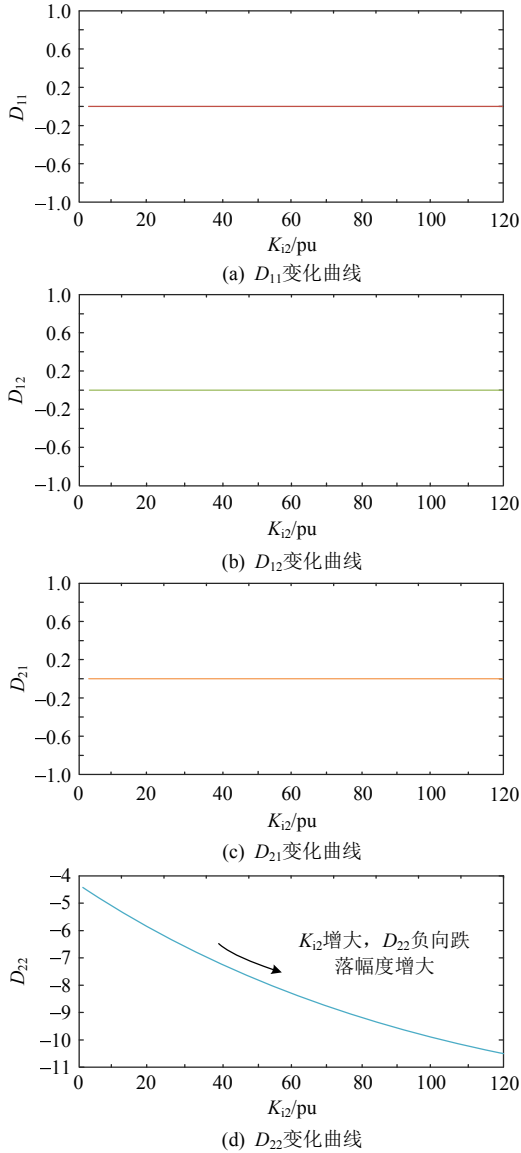
图15 第2层内各阻尼转矩分量的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of each damping torque component contained in the second layer

由图15可看出, K_{12} 增大时负阻尼转矩 D_{dd} 负向跌落幅度增大,不利于系统稳定;正阻尼转矩 D_{vd} 进一步增大,对系统稳定有积极作用; D_{dv} 、 D_{vv} 基本不变,影响很小。由此可得:在 K_{12} 影响下, D_{dd} 是第2层内的关键影响分量。

D_{dd} 对应第1层回路提供的阻尼转矩,第1层回路包含多条路径,须溯源具体回路。分别绘制 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{21} 、 D_{22} 变化曲线,如图16所示。

由图16可看出, K_{12} 变化下, D_{11} 、 D_{12} 、 D_{21}

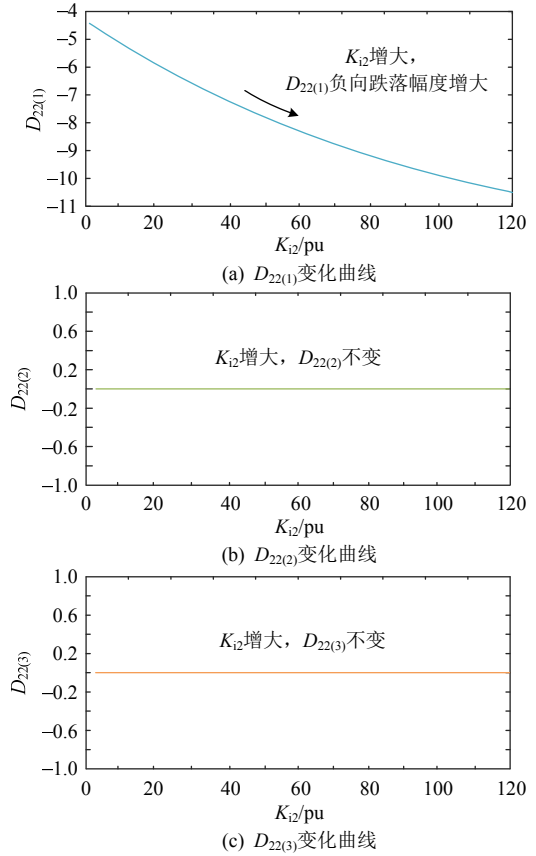
图 16 D_{dd} 包含的各阻尼转矩分量变化曲线Fig. 16 Variation curves of each damping torque component contained in D_{dd}

保持不变，而负阻尼转矩 D_{22} 负向跌落幅度增大，为主要影响分量。继续溯源 D_{22} ，分别绘制 $D_{22(1)}$ 、 $D_{22(2)}$ 、 $D_{22(3)}$ 变化曲线，如图 17 所示。

由图 17 可得， $D_{22(1)}$ 为主要影响分量， $D_{22(1)}$ 对应第 1 层回路中第 2 条直通回路提供的阻尼转矩，路径清晰，溯源结束。由此可得， T_{D212} 、 T_{D112} 在第 2 层回路中主要影响路径均为第 2 条直通回路。

通过具体路径溯源得到，造成 T_{D212} 和 T_{D112} 出现回路阻尼竞争现象的关键路径是：①第 2 条直通回路借第 4 条回路形成的互借旁通回路；②第 4 条回路借第 2 条直通回路形成的互借旁通回路。2 条回路提供的阻尼转矩分别定义为 $T_{D212(2)}$ 、 $T_{D112(2)}$ 。

由于 T_{D112} 为第 2 层直通回路借第 4 条回路提供的阻尼转矩，而根据图 17 结论可知，第 2 层内

图 17 D_{22} 包含的各阻尼转矩分量变化曲线Fig. 17 Variation curves of each damping torque component contained in D_{22}

主要影响路径为第 2 条直通回路。因此， T_{D112} 主要是通过第 2 条直通回路借第 4 条回路形成的互借直通回路向系统提供的负阻尼转矩，定义为 $T_{D112(2)}$ 。

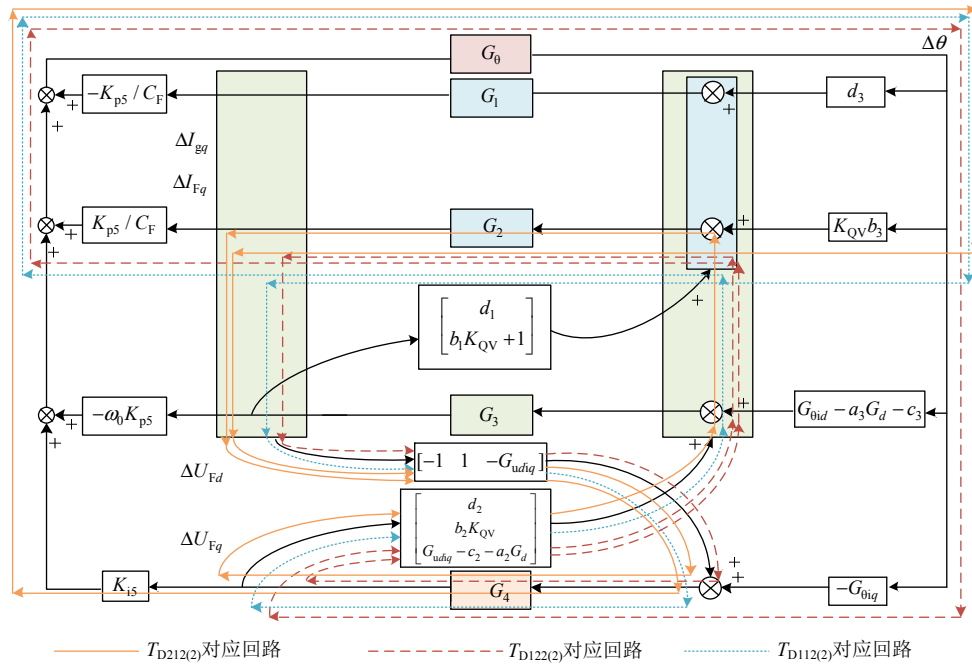
由此得到图 18 中 2 条竞争回路和 1 条提供负阻尼转矩回路。其中：实线为 $T_{D212(2)}$ 对应竞争回路，长虚线为 $T_{D122(2)}$ 对应竞争回路；短虚线为 $T_{D112(2)}$ 对应负阻尼转矩回路。

进一步揭示竞争回路间作用机制，分析竞争回路提供的阻尼转矩，其阻尼转矩公式为

$$\begin{cases} T_{D122(2)} = -\frac{1}{M\omega} \text{Im}(-\bar{G}_4 \bar{K}_1 \bar{G}_2 \bar{K}_2 C_3 G_2 K_2 G_4 C_2) \\ T_{D212(2)} = -\frac{1}{M\omega} \text{Im}(-\bar{G}_4 \bar{K}_1 \bar{G}_2 \bar{K}_2 C_4 G_4 K_1 G_2 C_1) \end{cases} \quad (12)$$

式中两传递函数的公共项为 $-\bar{G}_4 \bar{K}_1 \bar{G}_2 \bar{K}_2$ ，对应的路径为第 2 条回路和第 4 条回路形成的旁通回路。因此，区分二者的主要影响路径对应的阻尼转矩公式分别是

$$\begin{cases} T_{D122(2)1} = -\frac{1}{M\omega} \text{Im}(C_3 G_2 K_2 G_4 C_2) \\ T_{D212(2)1} = -\frac{1}{M\omega} \text{Im}(C_4 G_4 K_1 G_2 C_1) \end{cases} \quad (13)$$

图 18 K_{i2} 变化下的主要影响回路Fig. 18 Main influence loops under K_{i2} changes

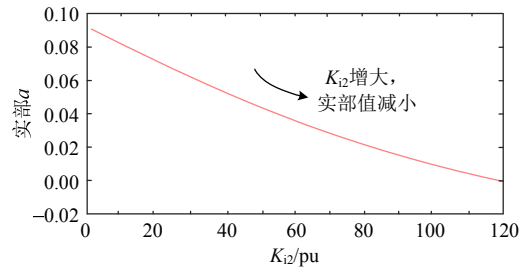
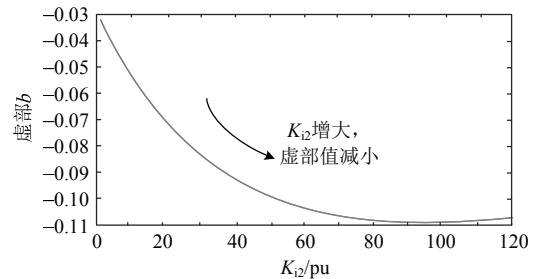
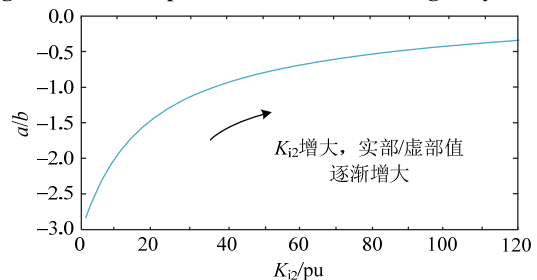
分析式(13)中的参数, 由系统原始公式可知, K_{i2} 变化主要影响传递函数 G_2 , 而其他参数保持不变。其中, C_1 、 C_3 为第 2 层直通回路两端的系数, 其值分别对应为 $[11.5303 \ -5.9029 \ 2.9514 \ -j527.38]^T$ 、 $[-1000 \ 1000 \ -15.708]$; C_2 、 C_4 为第 4 条直通回路两端的系数, 其值分别对应为 $-j1.5976$ 、 20 ; K_1 、 K_2 第 2 层回路与第 4 条回路间的反馈系数, 其值分别对应为 $[-1 \ 1 \ -0.0157]$ 、 $[0.0910 \ -0.0173 \ -4.1040 + j0.0809]^T$; G_4 对应第 4 条直通回路传递函数, 其值为 $-j213.63$; 参数 G_2 随 K_{i2} 的变化而改变, 设 $G_2 = a + jb$ 。

将各参数值代入式(13), 可得:

$$\begin{cases} T_{D122(2)l} = \frac{-433.68a - 14\,964.69b}{M\omega} \\ T_{D212(2)l} = \frac{-272\,564.06a - 35\,394.54b}{M\omega} \end{cases} \quad (14)$$

根据 3.1 节提出的竞争理论, 当回路提供的阻尼转矩变化趋势相反时, 构成阻尼竞争关系。由此, 分析式(14)两项, 当二者数值相反时, 构成阻尼竞争关系。对比计算两项, 当 $-34.5063 < a/b < -0.12986$ 时, 二者数值相反, 此时构成阻尼竞争关系。同时, 在 $a < -0.1845b$ 时, 竞争结果为正阻尼转矩, 为良性竞争关系。图 19、20 为 G_2 对应的值 $a + jb$ 中实部 a 和虚部 b 以及 a/b 随 K_{i2} 变化的值。

由图 19、20 可得, 在 K_{i2} 取 1~120 pu 时, a 的值逐渐减小, b 的值逐渐稳定在 -0.11 附近, 故 a/b

(a) 实部 a 变化曲线(b) 虚部 b 变化曲线图 19 G_2 对应的实部值和虚部值Fig. 19 G_2 corresponds to the real and imaginary values图 20 G_2 的实部与虚部的比值Fig. 20 Ratio of the real to imaginary part of G_2

的值逐渐增加, 但始终为 $-34.5063 \sim -0.12986$, 两回路间竞争关系成立。在 $K_{i2} = 120$ pu 时, a 仍小于

$-0.1845b$, 两回路间为良性竞争, 提供正阻尼转矩可抵消 $T_{D112(2)}$ 提供的部分负阻尼转矩。

因此, 参数 K_{i2} 影响下, 第 2 条回路借第 4 条回路构成的互借旁通回路($G_2-G_4-G_2-G_4$)与第 4 条回路借第 2 条回路构成的互借旁通回路($G_4-G_2-G_4-G_2$)构成回路阻尼良性竞争关系, 提供正阻尼转矩。但由于第 2 条回路借第 4 条回路构成的互借直通回路($G_2-G_4-G_2$)向系统提供更多的负阻尼转矩, 超过竞争正阻尼转矩, 导致总阻尼转矩降低、系统失稳。

2) 回路互激。

4.1 节分析得到 P 对锁相环稳定有很大影响。

因此, 本节进一步分析参数 P 影响下各阻尼转矩分量变化曲线, 溯源关键作用回路。

保持其他参数不变, 计算参数 P 影响下各阻尼转矩分量, 得到 7 个回路互激、竞争转矩分量以及 1 个总阻尼转矩, 如图 21 所示。

由图 21 可看出: 阻尼转矩分量 D_{qv} 与 D_{vq} 所在回路对系统提供负阻尼转矩, 且变化趋势相同, 构成阻尼互激关系。进一步分析互激机制, P 取 0.7~1.7 pu, 绘制 D_{qv} 、 D_{vq} 互激结果图, 如图 22 所示。

由图 22 可得, 当 P 增大超过临界点时, D_{qv} 、 D_{vq} 互激结果由正阻尼转矩变为负阻尼转矩, 由良性互激转为恶性互激, 为 P 影响下造成系统失稳的

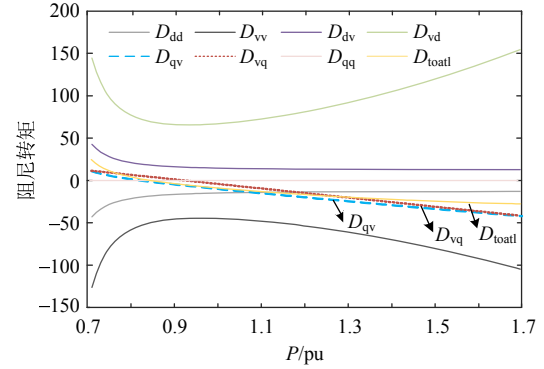


图 21 P 影响下各阻尼转矩分量变化曲线

Fig. 21 Variation curves of each damping torque component under the influence of P

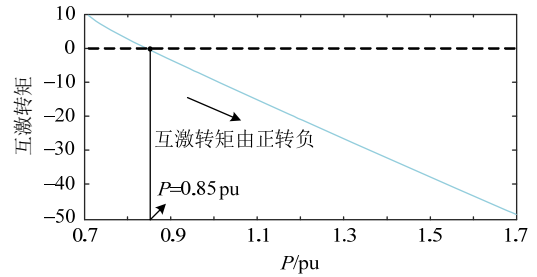


图 22 D_{qv} 、 D_{vq} 互激结果

Fig. 22 D_{qv} and D_{vq} cross-excitation results

关键原因。进一步溯源互激转矩 D_{qv} 、 D_{vq} 对应的关键作用回路, 方法同溯源 K_{i2} 影响下竞争路径相同, 给出最终溯源路径如图 23 所示。图中虚线为 D_{qv} 对应回路, 实线为 D_{vq} 对应回路。

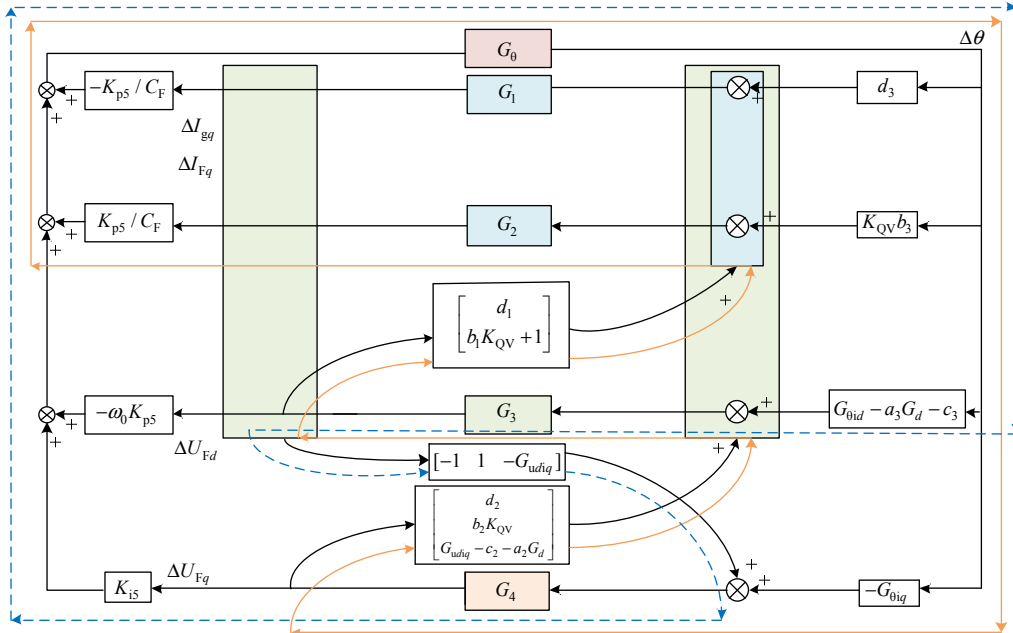


图 23 P 影响下的互激回路

Fig. 23 Reciprocal loops under the influence of P

由图 23 可得, P 影响下电压-电流-滤波的 d 轴模块和 q 轴模块交互影响强烈。 d 轴分量经 q 轴分量的旁通回路提供的阻尼与 q 轴分量回路间提供

的阻尼存在恶性互激关系, 为系统提供负阻尼转矩, 降低系统的稳定性。

分析该系统的其他关键影响参数, 结果如表 3

表3 影响参数的作用机制

Table 3 Action mechanism of influence parameter

影响参数	失稳机制
惯量 J	d 轴直通回路与 d 轴经 q 轴的互借旁通回路之间恶性竞争
阻尼 D	d 轴旁通回路与 d 轴经 q 轴的互借旁通回路之间恶性竞争
线路阻抗	q 轴经 d 轴的旁通回路与 q 轴回路间恶性竞争
锁相环	q 轴经 d 轴的旁通回路与 d 轴经 q 轴的
比例系数 K_{ps}	旁通回路间恶性竞争

所示。

本文方法清晰展现了跟网型逆变电源各控制回路间的交互作用路径，溯源了失稳参数影响的具体回路，揭示了多回路耦合失稳机制。可见：电网阻抗增大、锁相环比例系数 K_{ps} 减小、惯量 J 增大、阻尼 D 减小、有功 P 上升、电压环积分系数 K_{i2} 提高均不利于系统稳定。本文还准确溯源到失稳参数影响下的竞争、互激回路，揭示了回路间竞争、互激机制，对快速有效恢复系统稳定具有重要意义。

5 结论

本文针对传统的稳定性分析方法难以揭示跟网型逆变电源系统内部多回路间作用机制的问题，开展了造成系统失稳的关键参数溯源及参数影响下多回路间作用机制的研究。取得以下主要结论：

1) 本文提出的适用于分析跟网型逆变电源的嵌合转矩法能够清晰展现出控制系统回路间的耦合关系，能够揭示关键参数影响下的回路间作用机制。

2) 电网阻抗增大、锁相环比例系数 K_{ps} 减小、惯量 J 增大、阻尼 D 减小、电压环积分系数 K_{i2} 提高、有功功率 P 上升均不利于系统稳定。

3) 跟网型逆变电源控制系统中 q 轴互借直通回路提供负阻尼转矩，是电压环积分系数 K_{i2} 提高导致锁相环失稳的根本原因。

4) 有功功率 P 上升导致控制系统 d 轴分量经 q 轴分量的旁通回路提供的阻尼与 q 轴分量回路间提供的阻尼恶性互激，将恶化系统稳定性。

参考文献

[1] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5505.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy

with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505(in Chinese).

[2] 刘芳, 刘威, 徐韞钰, 等. 弱电网条件下并网逆变器控制环路稳定判据及交互作用规律分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 466-481.
LIU Fang, LIU Wei, XU Yunyu, et al. Analysis on stability criterion and interaction law of grid-connected inverter control loop under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 466-481(in Chinese).

[3] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.

[4] 张美清, 袁小明, 胡家兵. 基于自稳/致稳性的路径级数展开方法及其在含多样化电力电子装备电力系统稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1637-1654.
ZHANG Meiqing, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Path series expansion method based on self/en-stabilizing properties and its application in the stability analysis of power systems with diversified power electronic devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1637-1654(in Chinese).

[5] 刘倪, 张昌华, 段雪, 等. 并网逆变器小信号建模方法对比及其适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 134-141.
LIU Ni, ZHANG Changhua, DUAN Xue, et al. Comparison and applicability analysis of small-signal modeling methods for grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 134-141(in Chinese).

[6] HUANG Yunhui, YUAN Xiaoming, HU Jiabing, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.

[7] GAO Xian, ZHOU Dao, ANVARI-MOGHADDAM A, et al. Stability analysis of grid-following and grid-forming converters based on state-space model[C]//2022 International Power Electronics Conference(IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia). Himeji: IEEE, 2022: 422-428.

[8] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604.
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604(in Chinese).

- [9] 王丽馨, 王鑫太, 杨德友, 等. 基于完全数据驱动化递归模态参与因子的精细化阻尼调控策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9161-9173.
WANG Lixin, WANG Xintai, YANG Deyou, et al. Ambient data driven recursive mode participation factor based refined damping control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9161-9173(in Chinese).
- [10] 胡光, 高晖胜, 辛焕海, 等. 考虑惯量模态特征的电力系统频率性能量化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8559-8568.
HU Guang, GAO Huisheng, XIN Huanhai, et al. A quantification method for frequency performance of power system considering modal feature of inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8559-8568(in Chinese).
- [11] 张学广, 付志超, 陈文佳, 等. 弱电网下考虑锁相环影响的并网逆变器改进控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 139-145.
ZHANG Xueguang, FU Zhichao, CHEN Wenjia, et al. An improved control method for grid-connected inverters considering impact of phase-locked loop under weak grid condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 139-145(in Chinese).
- [12] 姜玉霞, 田艳军, 李永刚. 有功功率载荷波动对分布式发电并网逆变器稳定影响分析及其改进控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 646-654.
JIANG Yuxia, TIAN Yanjun, LI Yonggang. Analysis of the influence of active power load fluctuation on the stability of distributed generation grid-connected inverter and improved control strategy[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 646-654(in Chinese).
- [13] KHAZAEI J, BEZA M, BONGIORNO M. Impedance analysis of modular multi-level converters connected to weak AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4015-4025.
- [14] 陈杰, 闫震宇, 赵冰, 等. 下垂控制三相逆变器阻抗建模与并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4846-4856.
CHEN Jie, YAN Zhenyu, ZHAO Bing, et al. On the impedance modelling and grid-connected characteristics of the three-phase droop controlled inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4846-4856(in Chinese).
- [15] YI Chuanhuo, MA Zhengyang, LI Zhenbo, et al. Modeling and stability analysis of doubly-fed induction generator based on impedance analysis method for voltage source control[C]//2022 5th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering(ACEEE). Kuala Lumpur: IEEE, 2022: 97-102.
- [16] ASRARI A, MUSTAFA M, ANSARI M, et al. Impedance analysis of virtual synchronous generator-based vector controlled converters for weak AC grid integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1481-1490.
- [17] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268(in Chinese).
- [18] HUANG Liang, WU Chao, ZHOU Dao, et al. A simple impedance reshaping method for stability enhancement of grid-following inverter under weak grid[C]//2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems(PEDG). Chicago: IEEE, 2021: 1-6.
- [19] DU Wenjuan, REN Bixing, WANG Haifeng, et al. Comparison of methods to examine sub-synchronous oscillations caused by grid-connected wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4931-4943.
- [20] 罗永捷, 黄鹏, 段修超, 等. 考虑海上风电与 MMC 阻抗耦合的柔性直流送出系统等效阻抗建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2655-2669.
LUO Yongjie, HUANG Peng, DUAN Xiuchao, et al. Equivalent impedance modeling method for MMC-HVDC considering coupling of offshore wind power and MMC impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2655-2669(in Chinese).
- [21] 巨云涛, 马雅蓉, 齐志男. 基于阻尼转矩分析的虚拟同步机对小干扰稳定的影响机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 98-107.
JU Yuntao, MA Yarong, QI Zhinan. Research on the effect mechanism of virtual synchronous generator on small-signal stability based on damped torque analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 98-107(in Chinese).
- [22] 李培强, 胡泽, 李欣然, 等. 基于阻尼转矩分析法的光伏发电系统小信号建模分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6): 13-20.
LI Peiqiang, HU Ze, LI Xingran, et al. Small-signal stability analysis of photovoltaic power generation system based on damping torque analysis method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(6): 13-20(in Chinese).
- [23] LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 545-557.

- [24] 周涛, 陈中, 郭瑞兴. 基于闭环阻尼转矩分析法的电力系统稳定器参数整定[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 56-60.

ZHOU Tao, CHEN Zhong, GUO Ruixing. Power system stabilizer parameter tuning based on closed-loop damping torque analysis method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 56-60(in Chinese).

- [25] 黄林彬, 辛焕海, 鞠平, 等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 10-25.

HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25(in Chinese).

- [26] 周一辰, 李沙, 李永刚, 等. 基于嵌合转矩法的虚拟同步机多回路保结构稳定分析[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 733-749.

ZHOU Yichen, LI Sha, LI Yonggang, et al. Stability analysis of multi-loop guarantee structure of virtual synchronous machine based on chimeric torque method

[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 733-749(in Chinese).

附录

<http://ntps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232755>



周一辰

在线出版日期: 2024-05-17。

收稿日期: 2023-12-14。

作者简介:

周一辰(1990), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制等, zhou.yi.chen.1990@163.com;

徐宏伟(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制等, dqgcxhw@163.com;

李永刚(1967), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机与电力系统、新能源电力系统稳定分析与控制等, lygzxm0@163.com。

(责任编辑 邱丽萍)