

弱电网下多逆变器并网稳定性分析及提高策略

张世聪, 徐永海, 陶顺, 张智
(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 弱电网环境下由于电网阻抗较大, 多逆变器并联系统中电网与各逆变器之间的耦合程度增强, 导致系统稳定性下降甚至失稳。鉴于此, 提出了一种弱电网下多逆变器并网系统稳定性提高策略。首先, 建立了弱电网下单台和多台并网逆变器诺顿等效模型。然后, 从并网电流稳定性角度出发并基于等效电网阻抗概念将多逆变器系统稳定性判据解耦为单逆变器系统的稳定性判据, 明晰了弱电网下系统稳定性降低机理。进而提出了一种提高多逆变器系统稳定性的改进控制策略, 通过在电网电压前馈环节引入全通滤波器提高并网逆变器稳定裕度, 结合谐波控制器增强系统对背景谐波的抑制能力。最后, 通过仿真分析验证了所提策略能有效提高弱电网下多逆变器并网系统的稳定性。

关键词: 弱电网; 并网逆变器; 稳定性; 电网电压前馈; 背景谐波

Stability Analysis and Improved Strategy of Multi-Inverter Grid-Connected in Weak Grid

ZHANG Shicong, XU Yonghai, TAO Shun, ZHANG Zhi

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In weak grid environments, the larger grid impedance enhances the coupling between the grid and each inverter in a multi-inverter parallel system, resulting in decreased system stability or even instability. To address this, a strategy for improving the stability of multi-inverter grid-connected systems under weak grid conditions is proposed. Firstly, Norton equivalent models for single and multiple grid-connected inverters in weak grids are established. Secondly, from the perspective of grid-connected current stability, the stability criterion for the multi-inverter system is decoupled into that of a single-inverter system based on the concept of equivalent grid impedance, clarifying the mechanism behind the reduced system stability in weak grids. Subsequently, an improved control strategy to enhance the stability of the multi-inverter system is proposed, which increases the stability margin of grid-connected inverters by introducing an all-pass filter into the grid voltage feedforward loop and combines a harmonic controller to improve the system's ability to suppress background harmonics. Finally, simulation analysis verifies that the proposed strategy effectively enhances the stability of multi-inverter grid-connected systems under weak grid conditions.

Key words: weak grid; grid-connected inverter; stability; grid voltage feedforward; background harmonics

0 引言

随着能源转型战略的推进, 以光伏为代表的新能源发电在电力系统中的占比持续提升^[1-4]。受新能源发电位置分散、线路阻抗等因素影响, 公用电网逐渐呈现弱电网特征, 主要表现为电网阻抗较大, 且并网电压存在背景谐波^[5-6]。电网阻抗增大易引发逆变

器与电网间的谐振现象, 影响并网逆变器系统的稳定性; 而背景谐波则会导致逆变器并网电流畸变^[7-8]。作为新能源与电网的关键接口, 并网逆变器的稳定运行对整个系统的可靠运转具有重要意义^[9-10]。

为减弱逆变器并网电流中背景谐波的干扰, 通常会引入电网电压前馈环节, 然而该环节会增加额外的电网电流反馈路径, 降低系统稳定性^[11-12]。当逆变器与弱电网并联时, 若两者阻抗在交截频率处幅值相等且相位差为 180° , 系统与逆变器阻抗将匹配并产生谐振, 严重影响电能质量^[13-14]。随着电网阻抗增大, 交截点频率会向低频移动, 相角裕度

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52377101)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52377101).

不足会引发交截频率附近的谐波振荡, 振荡频率处的谐波会被逐步放大, 可通过提升并网逆变器阻抗相角的方法满足稳定裕度要求^[15-16]。此外, 模态分析法已被用于识别谐振频率及计算振荡模态下各支路间的耦合^[17]。文献[18]指出负阻尼特性会导致振荡失稳, 并基于模态阻抗的等效 RLC 并联电路定义了表征谐振模态阻尼特性的参数。文献[19]将模态分析法求解谐振点的应用拓展至求取相应谐振频率下系统的特征根, 指出系统阻尼会随逆变器台数增加而减小, 进而削弱系统抑制谐波振荡的能力, 提高系统鲁棒性的途径之一是增大系统的阻尼系数值, 上述方法有助于为逆变器多机并网的谐波振荡抑制提供解决方案。

针对系统稳定性降低问题, 文献[20-21]从改进有源阻尼策略角度出发, 通过相位补偿策略重塑逆变器输出阻抗的相角, 保证电网阻抗变化时系统具有较强的鲁棒性。文献[22]通过电容电流 PI 控制器反馈策略提高逆变器输出阻抗相位, 并结合粒子群优化算法与电网阻抗测量技术对控制参数动态优化, 但电网阻抗实时测量增加成本, 且检测结果准确性及检测速度仍待进一步提升^[23]。上述改进有源阻尼控制方法对弱电网逆变器失稳问题得到一定改善, 但尚未充分考虑电网电压低频次背景谐波对并网电流的影响。文献[24-26]从基于电压前馈角度出发使其不过多的降低逆变器输出阻抗相位, 从而提高逆变器弱电网下适应能力, 然而改进前馈策略会降低系统对背景谐波干扰的抑制效果。

随着新能源发电规模扩大, 越来越多新能源采用并联多逆变器结构。弱电网下电网阻抗较大导致逆变器耦合程度增强, 因而系统稳定性问题更加复杂^[27]。文献[28]指出由于耦合作用逆变器并联时各逆变器的等效电网阻抗为实际电网阻抗乘以逆变器数量, 系统稳定性降低。文献[29]进一步将多逆变器系统稳定性分为自身稳定与辅助系统稳定, 但上述结论受到并联逆变器参数相同的理想假设的限制, 且未给出稳定性改善策略。文献[30]指出弱电网下逆变器耦合作用增强从而产生谐振影响系统稳定性, 提出采用基于陷波器的虚拟导纳控制策略, 但改进策略未考虑背景谐波的影响, 且虚拟导纳导致低频处幅频特性降低。文献[31-32]将多逆变器系统稳定性分为自身稳定与外部稳定, 建立多逆变器并网多输入多输出模型, 在电容电流反馈回路引

入相角补偿提高系统鲁棒性, 但改进策略未考虑电网电压前馈环节的影响。电网阻抗大且电网电压背景谐波含量高为弱电网的重要特征, 在弱电网环境下, 计及电网阻抗及背景谐波影响的多逆变器并网系统稳定性提高策略仍待进一步研究。

针对上述问题, 本文首先建立含有电网电压前馈的多逆变器系统阻抗模型。其次, 基于等效电网阻抗概念将多逆变器并网系统稳定性分析解耦为各个单逆变器的稳定性分析, 明晰电网电压前馈及电网阻抗导致系统稳定性降低机理。进而提出在电网电压前馈环节引入全通滤波器以提高逆变器输出阻抗低频相位, 并结合谐波控制器增强背景谐波抑制能力的控制策略。理论与仿真分析验证了所提策略兼顾弱电网下系统对低次背景谐波的抑制能力与电网阻抗变化的适应能力。

1 逆变器阻抗建模

含电网电压前馈环节的 LCL 三相并网逆变器结构示意图如图 1 所示^[33]。系统采用 $\alpha\beta$ 坐标系控制方式, 其中 H_{11} 为电容电流有源阻尼系数, L_1 为 LCL 滤波器逆变器侧电感, L_2 为滤波器网侧电感, C 为滤波电容, u_g 与 u_{PCC} 分别为电网电压和并网点电压, L_l 与 L_g 分别为线路及电网电感, i_{ref} 为参考电流, H_{12} 为并网电流反馈系数, K_{PWM} 为逆变器等效环节, $G_i(s)$ 为准比例谐振电流调节器的传递函数, 如式(1)所示。

$$G_i(s) = K_p + \frac{K_r \omega_i s}{s^2 + 2\omega_i s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中: K_p 、 K_r 分别为电流调节器的比例与谐振系数; ω_i 为截止频率; s 为频域的复频率变量; ω_0 为基波角频率。

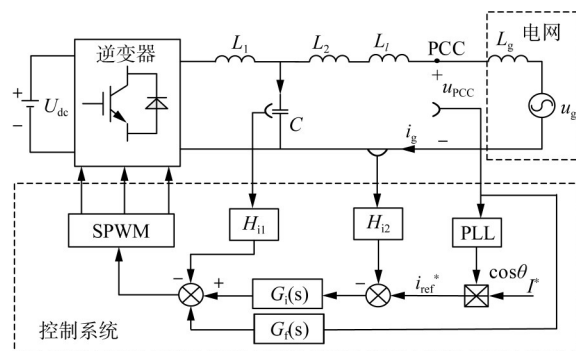


图 1 并网逆变器结构示意图

Fig. 1 Structure sketch diagram of grid-connected inverter

逆变器等效变化前后控制框图如图2所示。

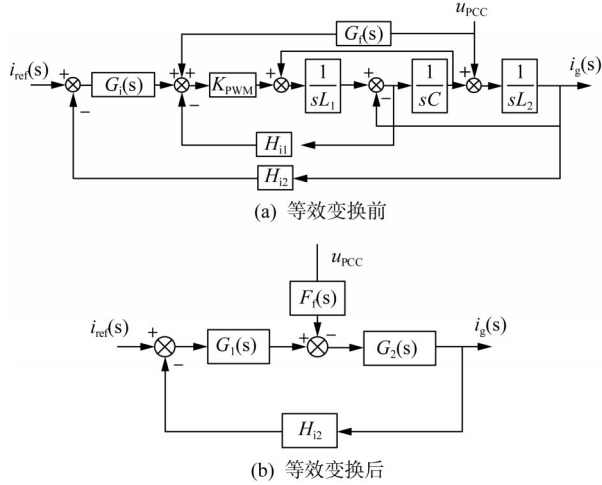


图2 逆变器等效控制框图

Fig. 2 Equivalent control block diagram of inverter

其中:

$$G_1(s) = \frac{G_i(s)K_{PWM}}{s^2L_1C + sCH_{i1}K_{PWM} + 1} \quad (2)$$

式中 $G_1(s)$ 为控制框图中扰动信号前传递函数。

$$G_2(s) = \frac{s^2L_1C + sCH_{i1}K_{PWM} + 1}{s^3L_1L_2C + sL_2CH_{i1}K_{PWM} + s(L_1 + L_2)} \quad (3)$$

$$F_f(s) = 1 - \frac{G_f(s)}{G_i(s)}G_1(s) \quad (4)$$

式中: $G_2(s)$ 为扰动信号后传递函数; $G_f(s)$ 为电网电压前馈环节; $F_f(s)$ 为化简后的电网电压前馈环节等效表达式。

联立上式可得:

$$i_g(s) = \frac{T_0(s)}{1 + T_0(s)} \frac{1}{H_{i2}} i_{ref} - Y_0(s)u_{PCC} \quad (5)$$

$$T_0(s) = G_1(s)G_2(s)H_{i2} \quad (6)$$

$$Y_0(s) = [s^2L_1C + sCH_{i1}K_{PWM} + 1 - G_f(s)K_{PWM}] / [s^3L_1L_2C + s^2L_2CH_{i1}K_{PWM} + s(L_1 + L_2) + G_i(s)H_{i2}K_{PWM}] \quad (7)$$

式中: $i_g(s)$ 为并网电流; i_{ref} 为逆变器参考电流; u_{PCC} 为并网点电压; $T_0(s)$ 为开环传递函数; $Y_0(s)$ 为逆变器输出导纳。计及电网与线路导纳, 图3为单台逆变器并网系统等效诺顿模型。

2 多机并网系统建模及稳定性分析

2.1 逆变器并联系统建模

基于单逆变器诺顿等效模型, 可得多逆变器并

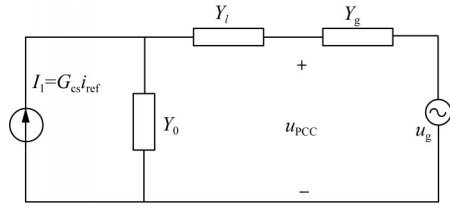


图3 并网逆变器等效诺顿模型

Fig. 3 Equivalent Norton model of inverter

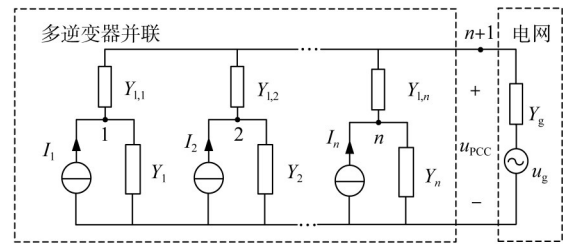


图4 多逆变器并联系统等效模型

Fig. 4 Equivalent model of multi-inverter parallel system

联系统等效模型如图4所示。

对各节点进行编号, PCC点为 $n+1$, 列写节点导纳矩阵如下。

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & 0 & Y_{1(n+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & Y_{nn} & Y_{n(n+1)} \\ Y_{(n+1)1} & \cdots & Y_{(n+1)n} & Y_{(n+1)(n+1)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 $Y_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$ 为节点导纳矩阵 i 行 j 列的元素; i, j 为节点编号; n 为节点数量。

其中:

$$\begin{cases} Y_{mm} = Y_m + Y_{L,m} \\ Y_{(n+1)(n+1)} = Y_g + \sum_{i=1}^n Y_{L,i} \\ Y_{m(n+1)} = Y_{(n+1)m} = -Y_{L,m} \end{cases} \quad (9)$$

式中: m 为节点编号; $Y_{L,m}$ 、 $Y_{L,i}$ 分别为第 m 节点、第 i 个逆变器的线路导纳; Y_g 为电网导纳; Y_m 为第 m 个逆变器的输出导纳。

联立可得第 m 台逆变器的并网电流 $i_{L,m}$ 为:

$$i_{L,m} = \underbrace{R_m(s)}_{\text{自耦合}} I_m(s) - \underbrace{\sum_{k=1, k \neq m}^n P_{m,k}(s) I_k(s)}_{\text{逆变器间耦合}} - \underbrace{S_{gm}(s)}_{\text{电网耦合}} u_g(s) \quad (10)$$

式中: $R_m(s)$ 、 $P_{m,k}(s)$ 及 $S_{gm}(s)$ 分别为各逆变器输出电流与自身电流、其他逆变器电流及电网电压耦合关系的传递函数; $I_m(s)$ 与 $I_k(s)$ 代表第 m 与第 k

个逆变器的电流传递函数； $u_g(s)$ 为电网电压传递函数。

$R_m(s)$ 、 $P_{m,k}(s)$ 及 $S_{gm}(s)$ 的表达式如下：

$$\begin{cases} R_m(s) = Y_{\text{temp},m} \frac{Y_g + \sum_{i=1, i \neq m}^n Y_i \parallel Y_{L,i}}{Y_{\text{den}}} \\ P_{m,k}(s) = Y_{\text{temp},m} \frac{Y_m \frac{Y_{L,k}}{Y_{L,k} + Y_k}}{Y_{\text{den}}}, \\ k \in [1, n], k \in Z, k \neq m \\ S_{gm}(s) = Y_{\text{temp},m} Y_m \frac{Y_g}{Y_{\text{den}}} \end{cases} \quad (11)$$

$$Y_{\text{temp},m} = \frac{Y_{L,m}}{Y_{L,m} + Y_m} \quad (12)$$

$$Y_{\text{den}} = Y_g + \sum_{i=1}^n Y_i \parallel Y_{L,i} \quad (13)$$

式中： $Y_{\text{temp},m}$ 与 Y_{den} 分别为经等效化简后的分母与分子系数表达式； Y_g 为电网导纳； Y_i 、 Y_k 与 Y_m 分别为逆变器 i 、逆变器 k 与逆变器 m 的导纳； $Y_{L,k}$ 为第 k 个逆变器的线路导纳。

根据式(10)可知，电网阻抗的存在导致各逆变器输出电流受其他逆变器输出电流及电网电压的影响，逆变器间存在耦合。可得多逆变器系统并网电流 i_g 表达式为：

$$i_g = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \parallel Y_{L,i}}{Y_g}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \frac{Y_i}{Y_{L,i}}} (I_i - u_g Y_g) \quad (14)$$

式中： u_g 为电网电压； n 为逆变器数量。

结合稳定性判据可得多逆变器并网系统稳定条件^[17, 34]如下。

1) 各逆变器在无电网阻抗的理想电网环境下自身设计稳定。

2) 电网导纳和 PCC 点处总的逆变器侧输出导纳满足阻抗稳定性判据。

2.2 系统稳定性分析

阻抗稳定性判据通过分析并网电流的整体稳定性来判断并网系统的稳定性，但并网电流为各逆变器输出电流之和，因此无法分析各逆变器输出电流对并网电流稳定性的影响，当系统出现不稳定现象时，无法分析系统失稳机理，也无法给出指导性的稳定性提高策略。

为进一步分析存在电网阻抗情况下的多逆变器

并网稳定性影响机理，本文将并网电流稳定性转化为各逆变器输出电流稳定性，根据式(10)将 m 逆变器输出电流 $i_{L,m}$ 分为入网电流 $i_{g,m}$ 与交互电流 i_{mi} (下标 i 代表 i 逆变器) 两部分，表达式如下。

$$i_{L,m} = i_{g,m} + \sum_{i=1, i \neq m}^n i_{mi} \quad (15)$$

$$i_{g,m} = Y_{\text{temp},m} \frac{Y_g}{Y_{\text{den}}} I_m - Y_{\text{temp},m} \frac{Y_m}{Y_{\text{den}}} Y_g \quad (16)$$

$$i_{mi} = Y_{\text{temp},m} \left(\frac{Y_i \parallel Y_{L,i}}{Y_{\text{den}}} I_m - \frac{Y_m Y_{L,i}}{Y_{\text{den}} (Y_i + Y_{L,i})} I_i \right) \quad (17)$$

因此可将式(14)表示为以下形式：

$$i_g = \sum_{m=1}^n i_{L,m} = \sum_{m=1}^n i_{g,m} + \sum_{m=1}^n \sum_{i=1, i \neq m}^n i_{mi} \quad (18)$$

式中 I_m 和 I_i 分别为逆变器 m 与逆变器 i 的输出电流。

根据交互电流表达式(17)可得：

1) 交互电流产生原因为电网阻抗导致逆变器间存在耦合，当电网阻抗 $Z_g = 0$ 时，各逆变器输出电流不受其他逆变器影响，交互电流 $i_{mi} = 0$ 。

2) 化简可得 $i_{(n-1)n} = i_{n(n-1)}$ ，因此交互电流之和可进一步表示为：

$$\sum_{m=1}^n \sum_{i=1, i \neq m}^n i_{mi} = [(i_{12} + i_{21}) + \cdots + (i_{(n-1)n} + i_{n(n-1)})] = 0 \quad (19)$$

即逆变器之间虽由于电网阻抗的影响而存在交互作用电流，但交互电流部分最终会相互抵消，并且不会流入电网中。将式(19)代入式(18)，总并网电流 i_g 可进一步表示为：

$$i_g = \sum_{m=1}^n i_{g,m} \quad (20)$$

进一步根据式(16)可将 m 逆变器并网电流 $i_{g,m}$ 化简为：

$$\begin{aligned} i_{g,m} &= \frac{Y_g}{Y_g + \sum_{i=1}^n Y_{\text{eq},i}} I_{\text{eq},m} - \frac{Y_{\text{eq},m} Y_g}{Y_g + \sum_{i=1}^n Y_{\text{eq},i}} u_g \\ &= \frac{Y_g}{Y_g + \sum_{i=1}^n Y_{\text{eq},i}} (I_{\text{eq},m} - Y_{\text{eq},m} u_g) \end{aligned} \quad (21)$$

式中： $I_{\text{eq},m}$ 为计及线路阻抗后 m 逆变器等效输出电流源； $Y_{\text{eq},i}$ 、 $Y_{\text{eq},m}$ 分别为计及线路阻抗后 i 、 m 逆变器的等效输出导纳。两者的表达式如下。

$$I_{\text{eq},m} = \frac{Y_{L,m}}{Y_{L,m} + Y_m} I_m \quad (22)$$

$$Y_{eq,i} = \frac{Y_i}{1 + Z_{l,i} Y_i} = \frac{1}{Z_{eq,i}} \quad (23)$$

式中: $Z_{l,i}$ 为第 i 个逆变器的线路阻抗; $Z_{eq,i}$ 为计及线路阻抗后 i 逆变器的等效输出阻抗。

$$\begin{aligned} i_{g,m} &= \frac{Z_{eq,m} I_{eq,m} - u_g}{Z_{eq,m} + Z_{eq,m} Z_g \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} = \frac{Z_{eq,m} I_{eq,m} - u_g}{Z_{eq,m} + Z_{g,m}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{Z_{g,m}}{Z_{eq,m}}} (I_{eq,m} - Y_{eq,m} u_g) \end{aligned}$$

式中 $Z_{eq,m}$ 为逆变器 m 的等效阻抗。

根据式(21)可得:

$$\begin{aligned} i_{g,m} &= \frac{Z_{eq,m} I_{eq,m} - u_g}{Z_{eq,m} + Z_{eq,m} Z_g \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} = \frac{Z_{eq,m} I_{eq,m} - u_g}{Z_{eq,m} + Z_{g,m}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{Z_{g,m}}{Z_{eq,m}}} (I_{eq,m} - Y_{eq,m} u_g) \end{aligned} \quad (24)$$

式中 $Z_{g,m}$ 为等效电网阻抗, 表达式如下:

$$Z_{g,m} = Z_{eq,m} Z_g \sum_{i=1}^n Y_{eq,i} = \frac{Z_{eq,m}}{Z_{eq,1} \parallel \dots \parallel Z_{eq,n}} Z_g \quad (25)$$

对应的等效电网导纳 $Y_{g,m}$ 为:

$$Y_{g,m} = \frac{Y_{eq,m}}{Y_{eq,1} + Y_{eq,2} + \dots + Y_{eq,n}} Y_g \quad (26)$$

多逆变器并网系统中电网阻抗增大及逆变器数量增加均会导致等效电网阻抗增加, 特例情况下, 当各逆变器参数相同时各逆变器等效电网阻抗均为 n 倍电网阻抗。

为便于分析稳定性, 定义逆变器输出电流稳定性分析传递函数 G^* 为:

$$G^* = \frac{1}{1 + \frac{Y_{eq,m}}{Y_{g,m}}} \quad (27)$$

根据式(24)可得逆变器 m 输出电流 $i_{g,m}$ 电流稳定条件为:

1) 在无电网阻抗的理想电网环境下自身稳定。

2) G^* 系统稳定, 即不存在右半平面极点, 可进一步等价为逆变器等效输出阻抗 $Z_{eq,m}$ 与等效电网阻抗 $Z_{g,m}$ 之比的Nyquist曲线不包含 $(-1, j0)$ 。

本节重点关注多机并联系统的整体稳定性, 故默认系统中各逆变器在参数设计时可保证无电网阻抗时的自稳定性, 因此, 每台逆变器电流稳定性由 $Z_{eq,m}$ 与 $Z_{g,m}$ 阻抗比稳定性判据决定。结合式(20)可

将总并网电流 i_g 进一步等价为:

$$i_g = \sum_{m=1}^n \frac{1}{1 + \frac{Y_{eq,m}}{Y_{g,m}}} (I_{eq,m} - Y_{eq,m} u_g) \quad (28)$$

根据式(28)可得弱电网下多逆变器并联系统的稳定性分析等效电路如图5所示。

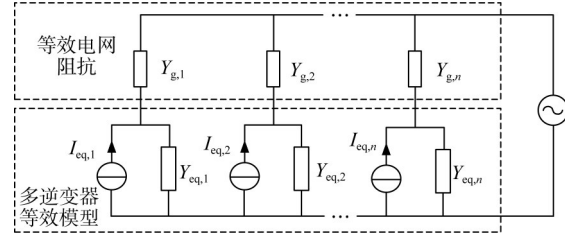


图5 多逆变器并网稳定性分析等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram for stability analysis of multi-inverter grid connection

根据图5可得, 基于等效电网阻抗概念将由电网阻抗引起的各逆变器稳定性之间的耦合关系解耦, 多逆变器并网系统的稳定性研究可以转化为对各单逆变器并网系统稳定性的研究, 即各逆变器在自身设计稳定的前提下稳定性由 G^* 系统决定, 多机系统整体稳定性等效转化为各 G^* 系统稳定性问题。当各逆变器参数相同时各逆变器 G^* 系统具有相同的稳定性判定条件。

针对各逆变器的稳定性分析, 弱电网下电流回路与前馈控制间存在耦合, 等效电网阻抗大小将直接影响逆变器与电网间交互作用, 当电网侧存在阻抗时逆变器等效输出阻抗与等效电网阻抗之比满足稳定判据才能保证系统稳定运行, 即逆变器等效输出阻抗与等效电网阻抗相交时相位裕度为正, 相位裕度 P_M 表达式如下^[35-36]。

$$\begin{aligned} P_M &= 180^\circ + \angle Z_{eq,m}(j2\pi f_0) - \angle Z_{g,m}(j2\pi f_0) \\ &= 90^\circ + \angle Z_{eq,m}(j2\pi f_0) \end{aligned} \quad (29)$$

式中 f_0 为交点频率。一般要求 $P_M \geq 30^\circ$, 以免因相位裕度的不足引发谐振^[14, 37]。

为抑制背景谐波对并网波形的影响通常采用电网电压前馈策略, 图6为不同情况下逆变器输出阻抗与电网阻抗(0.5 mH、1.5 mH、2 mH及3 mH), 相关参数见表1。引入电网电压前馈后逆变低频段输出阻抗相位下降, 弱电网下随着逆变器数量增加及电网阻抗增大, 逆变器与电网阻抗交点向低频移动, 两者相位差增大, 系统阻尼越来越弱, 稳定裕度降低导致更加容易振荡失稳。若相位裕度小于

零, 则系统失稳, 将出现剧烈振荡; 系统相位裕度大于 0 但接近于 0 时系统鲁棒性较差, 易受到谐波源的影响。

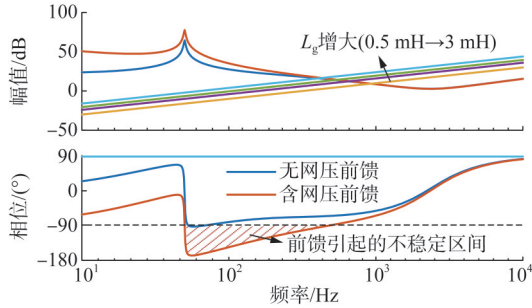


图 6 逆变器输出阻抗 Bode 图

Fig. 6 Bode diagram of inverter output impedance

表 1 逆变器参数

Tab. 1 Parameters of the inverter

系统参数	数值
电网电压 u_g/V	220
逆变器侧电感 L_1/mH	0.8
电网侧电感 L_2/mH	0.1
滤波器电容 $C/\mu F$	10
线路电感 L/mH	0.1
准比例谐振控制器参数 K_p	0.68
准比例谐振控制器参数 K_i	85
电容电流反馈系数 H_{i1}	0.12
并网电流反馈系数 H_{i2}	0.05

在电网阻抗与逆变器交点处两者幅值相等, 稳定裕度降低导致谐波振荡机理分析如图 7 所示。电网阻抗将整个阻抗平面分为左右两部分, 右半部分为稳定区域, 左半部分为不稳定区域。由于逆变器输出阻抗相位在中低频段呈现阻容特性, 交点频率降低导致逆变器与电网阻抗相位差增大, 变化趋势如箭头方向所示。随着相位差接近 180° , 系统谐波放大能力增强。当阻抗相位差超过 180° 时, 结合式 (27) 可得系统不满足奈奎斯特稳定性判据, 这会导致系统负阻尼现象并引发振荡失稳。

弱电网下并网逆变器闭环零极点图随电网阻抗变化趋势如图 8 所示, 随着电网阻抗增大系统闭环极点逐渐向右半平面移动, 系统可能进入不稳定状态, 稳定性不足导致系统出现谐波振荡, 当存在背景谐波时电能质量可能进一步恶化, 因此需采取措施提高系统对弱电网适应性。

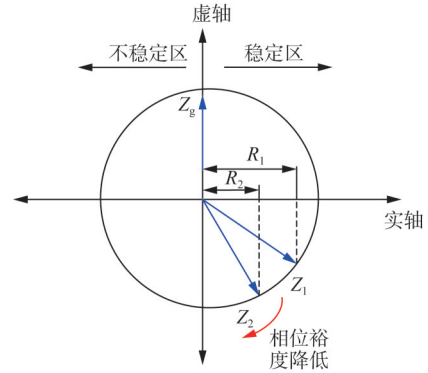


图 7 振荡稳定性分析示意图

Fig. 7 Diagram of oscillation stability analysis

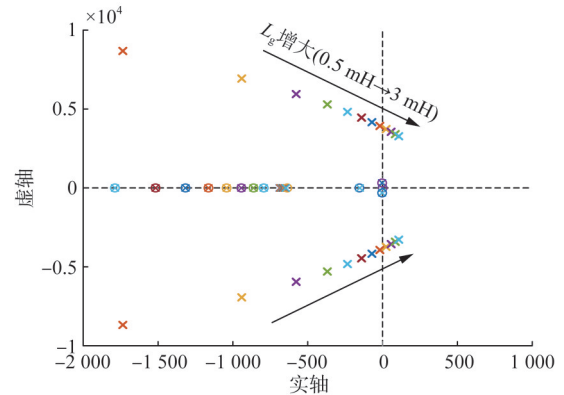


图 8 闭环零极点图

Fig. 8 Closed-loop pole-zero plot

3 多逆变器并网系统稳定性提高策略

弱电网下较大电网阻抗导致系统振荡失稳, 背景谐波进一步导致并网电流畸变, 相位补偿稳定性提高措施对系统稳定性有较好改善, 然而存在背景谐波时可能无法有效保证系统并网质量。针对上述问题, 本文提出一种基于全通滤波器前馈与谐波补偿器相结合的改进控制策略, 所提策略在提高稳定性同时对背景谐波和逆变器自身产生的谐波具有良好的抑制作用, 具有更好的弱电网适应性。

3.1 基于全通滤波器的电网电压前馈策略

根据前文分析可得, 电网电压前馈引入后, 逆变器输出阻抗在低频段的相位下降, 为提升并网系统稳定性, 需增加逆变器的低频段输出阻抗相位。为此, 在前馈通道引入全通滤波器, 在不改变前馈通道信号幅值的情况下实现相位的超前补偿, 全通滤波器传递函数 $G_b(s)$ 如式 (30) 所示。

$$G_b(s) = \frac{s^2 - (\omega_c/Q)s + \omega_c^2}{s^2 + (\omega_c/Q)s + \omega_c^2} \quad (30)$$

式中: ω_c 为补偿角频率; Q 为品质因数, 通常取 0.707。全通滤波器频率特性如图 9 所示, 其对前馈信号幅值无衰减作用, 仅对相位进行超前补偿。

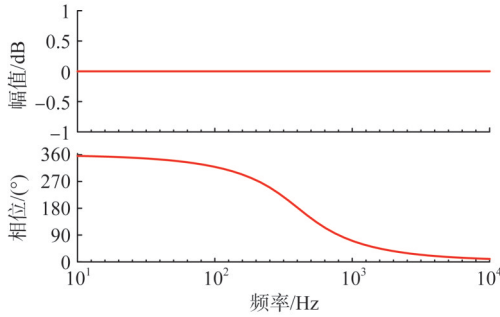


图 9 全通滤波器频率特性

Fig. 9 Frequency characteristics of all-pass filter

图 10 为改进后系统控制框图。

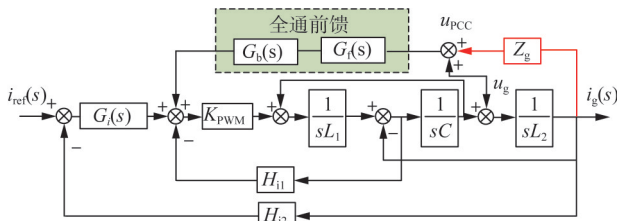


图 10 全通滤波器前馈控制框图

Fig. 10 Control block diagram of all-pass filter feedforward

结合式(4), 在前馈通道引入全通滤波器后, 有:

$$Z_1(s) = [s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_2 C H_{11} K_{PWM} + s(L_1 + L_2) + G_{12}(s) H_{12} K_{PWM}] / [s^2 L_1 C + s C H_{11} K_{PWM} + 1 - G_f(s) G_b(s) K_{PWM}] \quad (31)$$

式中 $Z_1(s)$ 为前馈通道引入全通滤波器后逆变器的输出阻抗。

可得采用全通滤波器前馈后逆变器输出阻抗伯德图如图 11 所示。

前馈环节引入全通滤波器后逆变器输出阻抗在低频段相位明显提升, 与电网阻抗交点处相角增大, 系统稳定裕度得到改善, 且随着电网阻抗增大系统极点均位于左半平面, 系统可始终保持稳定状态。

针对各逆变器进一步绘制闭环零极点图随电网阻抗变化情况如图 12 所示。

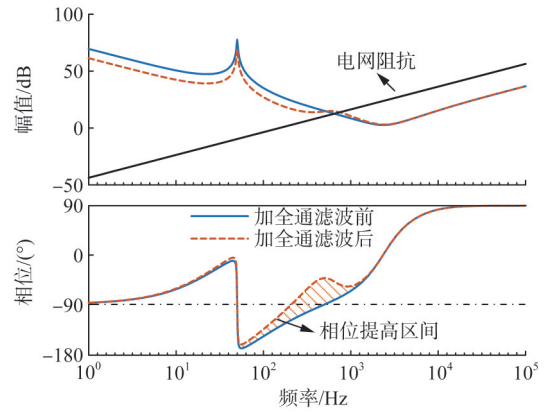


图 11 采用全通前馈后逆变器输出阻抗 Bode 图

Fig. 11 Bode diagram of inverter output impedance after all-pass feedforward

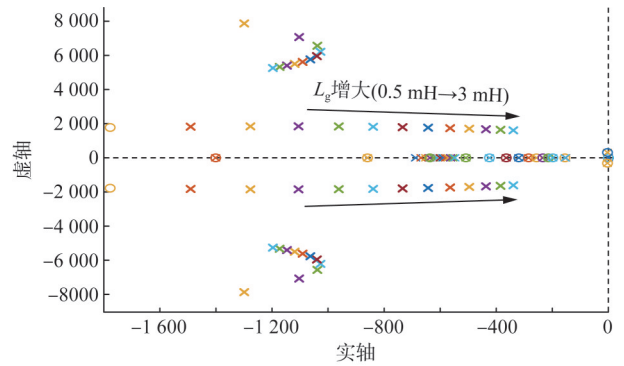


图 12 全通滤波器前馈后闭环零极点图

Fig. 12 Closed-loop pole-zero plot after all-pass filter feedforward

随着电网阻抗增大系统极点均位于左半平面, 有效增强系统弱电网下对电网阻抗变化的鲁棒性。

3.2 全通滤波器前馈结合谐波控制器控制策略

弱电网下电网电压背景谐波含量较高, 背景谐波对并网电流的影响如式(32)所示。

$$I_{gh} = \frac{U_{gh}}{Z_0(s) + Z_g(s)} \quad (32)$$

式中: I_{gh} 和 U_{gh} 分别为并网电流与背景谐波的 h 次谐波分量; $Z_0(s)$ 、 $Z_g(s)$ 分别为逆变器与电网的等效阻抗。

背景谐波频率处逆变器输出阻抗的幅值越大时背景谐波对并网电流的影响越小, 系统对背景谐波的抑制能力越强。

为比较在不同控制策略下系统对电网电压背景谐波的抑制能力, 定义 k_z 为:

$$k_z = \frac{|Z_{o1}(s)|}{|Z_c(s)|} \quad (33)$$

式中： k_z 为背景谐波抗干扰能力系数； $Z_c(s)$ 为采用不同控制策略下逆变器输出阻抗， $Z_{o1}(s)$ 为逆变器不考虑电网电压前馈的原始输出阻抗。当 k_z 小于1时，逆变器输出阻抗增加，背景谐波抑制能力提升。

将式(7)与式(31)代入式(33)，可得电网电压比例前馈与经全通滤波器前馈的 k_z 频率特性曲线如图13所示。两种策略的 k_z 值均小于1，均可减弱并网电流中背景谐波的干扰。然而，引入全通滤波器提高相位裕度的同时 k_z 值增大且接近于1，即逆变器输出阻抗幅值降低，进而降低对背景谐波电压干扰的抑制效果，易导致并网电流包含大量与背景谐波同频次的谐波。

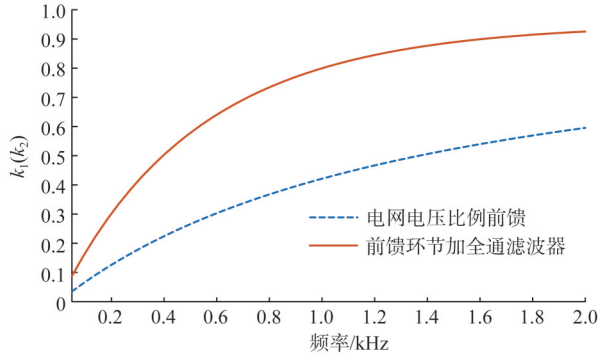


图 13 k_z 频率特性曲线

Fig. 13 Frequency characteristics curves of k_z

针对弱电网下背景谐波的影响，本文提出一种将全通滤波器前馈与谐波控制器相结合的改进控制策略，旨在提升并网逆变器对弱电网的适应能力，同时兼顾背景谐波抑制效果。该改进策略的结构框图如图14所示。

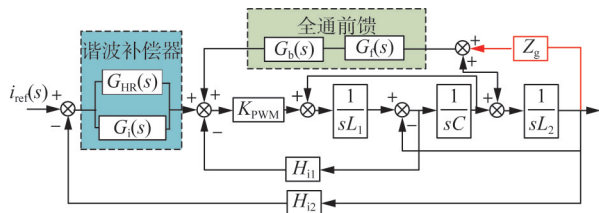


图 14 改进策略控制框图

Fig. 14 Control block diagram of improved strategy

本文采用相位补偿谐波控制器，以5、7与9次谐波补偿为例，谐波控制器传递函数 $G_{HR}(s)$ 为：

$$G_{HR}(s) = \sum_{h=5,7,9} \frac{A_h \omega_b (s \cos \theta_h - \omega_h \sin \theta_h)}{s^2 + \omega_b s + \omega_h^2} \quad (34)$$

式中： A_h 为控制器增益系数； θ_h 为补偿角度； ω_h 、 ω_b 分别为补偿的角频率值与带宽； h 为谐波次数。

采用本文改进策略后逆变器输出阻抗表达式可表示为：

$$Z_2(s) = [s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_2 C H_{i1} K_{PWM} + s(L_1 + L_2) + G_{i2}(s) H_{i2} K_{PWM}] / [s^2 L_1 C + s C H_{i1} K_{PWM} + 1 - G_f(s) G_b(s) K_{PWM}] \quad (35)$$

在补偿频率处的输出阻抗幅值应大于补偿前，因此本文综合选取谐波补偿器的增益值为3。图15为采取所提改进策略后逆变器输出阻抗伯德图，全通滤波器前馈可提高逆变器输出阻抗低频段相位，结合谐波补偿器提高输出阻抗低频段背景谐波频次下的幅值，保证系统相角裕度的同时显著提高对背景谐波电压的抗干扰能力。

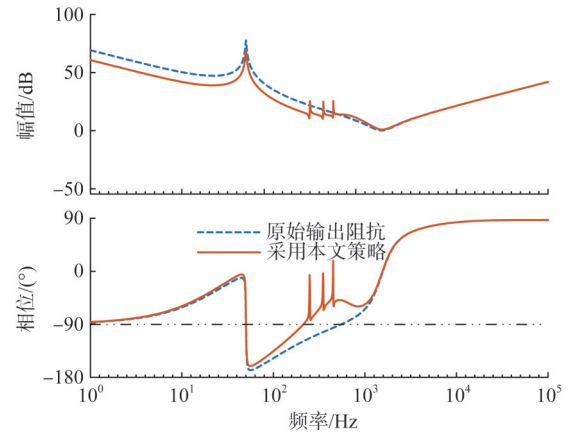


图 15 采用改进策略后逆变器输出阻抗

Fig. 15 Output impedance of inverter after adopting improved strategy

本文所提改进控制策略兼顾弱电网下系统鲁棒性和背景谐波抑制能力。

4 仿真验证

基于仿真弱电网环境，结合有无背景谐波两种工况下不同数量并网逆变器的并网运行情况，验证所提方法的有效性，逆变器参数见表1。

4.1 所提策略有效性验证

针对弱电网场景，本文基于调整电网电感 L_g 大小实现不同电网强度调节，不同情况下并网点电压与电流波形结果如图16所示。

当电网阻抗发生变化时(短路比SCR值由10变为2，对应电网电感 L_g 的变化范围为0.5~4 mH)，

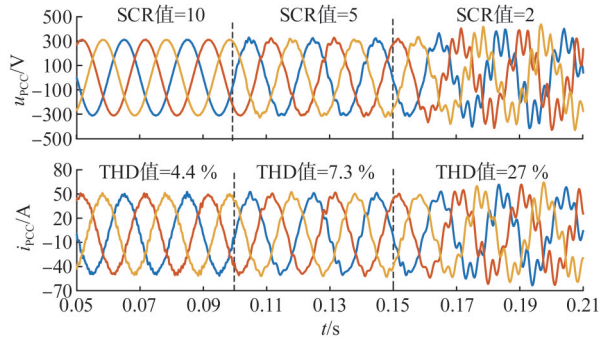


图16 采用改进策略前的逆变器并网波形图

Fig. 16 Waveforms diagram of inverter before adopting improved strategy

采用传统电网电压比例前馈控制的系统鲁棒性较差。随着系统SCR值从10下降至2,并网电流波形逐渐出现严重畸变,其总谐波畸变率THD分别达到4.4%、7.3%和27%。这主要是因为电网阻抗增加导致系统稳定裕度降低。采用本文提出的控制策略后,并网波形如图17所示。

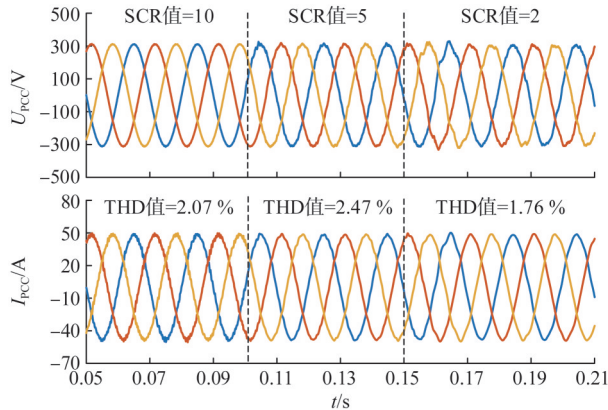


图17 采用改进策略后的逆变器并网波形图

Fig. 17 Waveform diagrams of inverter after adopting improved strategy

采用本文所提控制策略后,即使在极弱电网工况下,并网波形质量仍能保持良好。在不同电网短路比条件下,并网电流的总谐波畸变率(THD)分别为2.07%、2.47%和1.76%。

为进一步验证所提策略的有效性,在短路比(SCR)为2的极弱电网条件下,对两台并网逆变器开展仿真研究。考虑到实际场景中多台逆变器并联时普遍存在参数差异,即便来自同一厂商也难以保证参数完全一致,因此设置不同逆变器的参数差异如表2所示。

由于实际弱电网存在背景谐波,在电网电压中

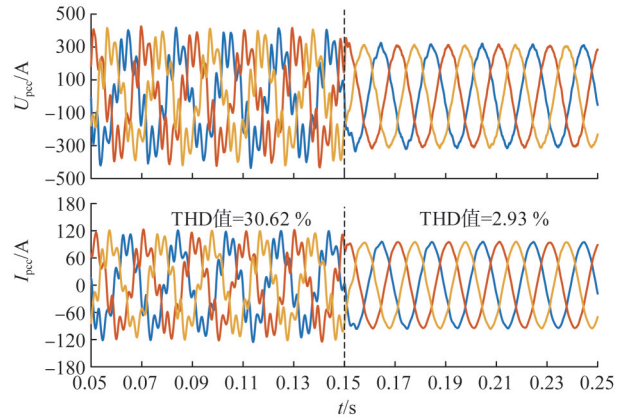
表2 不同参数设置

Tab. 2 Different parameters settings

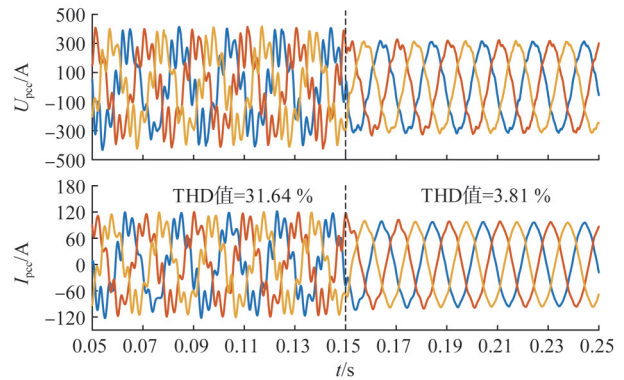
系统参数	两种不同参数数值
逆变器侧电感 L_1/mH	0.8, 0.85
电网侧电感 L_2/mH	0.1, 0.12
滤波器电容 $C/\mu\text{F}$	9, 10
线路电感 L_2'/mH	0.15, 0.07

添加2.5%和1.5%的5次和7次背景谐波,进一步验证本文所提策略对逆变器参数波动及电网存在背景谐波情况下的适应性。

有无背景谐波情况下逆变器的并网电流与PCC点电压如图18所示。加入背景谐波前后并网电流的THD值分别为30.62%和31.64%,电网阻抗增大将导致系统稳定性下降,而背景谐波会进一步加剧并网电流的畸变。考虑到实际逆变器参数的波动性差异及背景谐波的影响,所提策略下的并网电流THD分别为2.93%和3.81%。



(a) 无背景谐波



(b) 含背景谐波

图18 不同参数下逆变器并网波形图

Fig. 18 Waveforms diagrams of grid-connected inverter with different parameters

进一步验证多台逆变器同时并网时系统的稳定性分析及本文所提策略有效性, 分别在有无背景谐波情况下进行多台(4台)逆变器并网仿真, 电网电感取 1 mH, 并网波形如图 19 所示。

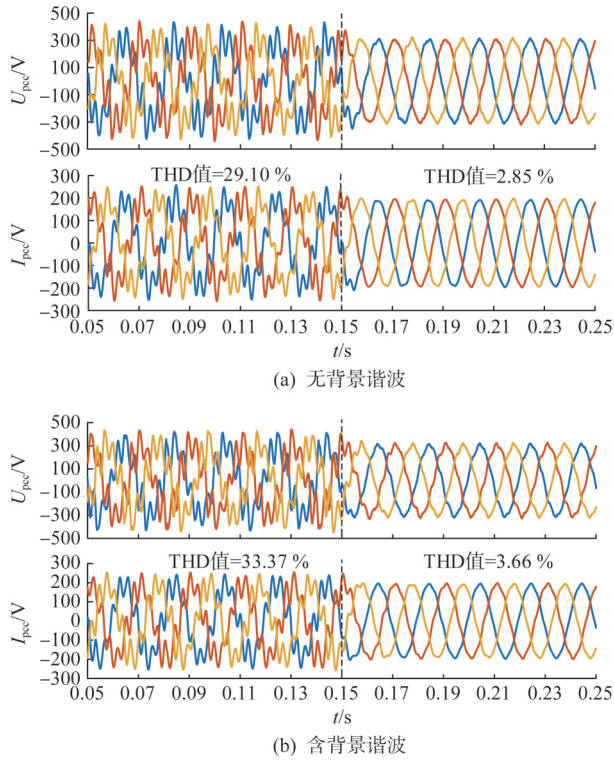


图 19 多逆变器并网系统并网波形图

Fig. 19 Waveform diagrams of multi-inverter grid-connected system

与单台并网系统相比, 逆变器数量增加导致逆变器与电网耦合作用增强, 与前文理论分析一致。有无背景谐波并网电流 THD 值分别为 29.10 % 和 33.37 %, 采用本文所提策略后电流 THD 值分别为 2.85 % 和 3.66 %, 仍可确保多逆变器并网系统弱电网下的适应能力。

4.2 不同控制策略对比

为进一步验证本文方法在弱电网下对稳定性及背景谐波抑制能力的有效性, 分别将本文方法与相关文献中的稳定性提升策略进行对比。基于提高逆变器输出原始输出阻抗相角及改进电网电压前馈两个角度, 以文献[19]提出的相位提升策略为方法 1、文献[23]提出的改进前馈法为方法 2, 研究弱电网不同情况下的并网电流改善效果。0.15 s 时采用方法 1, 0.2 s 时采用方法 2, 0.25 s 时采用本文方法; 考虑逆变器参数差异, 并网电压与电流波形如图 20

所示。

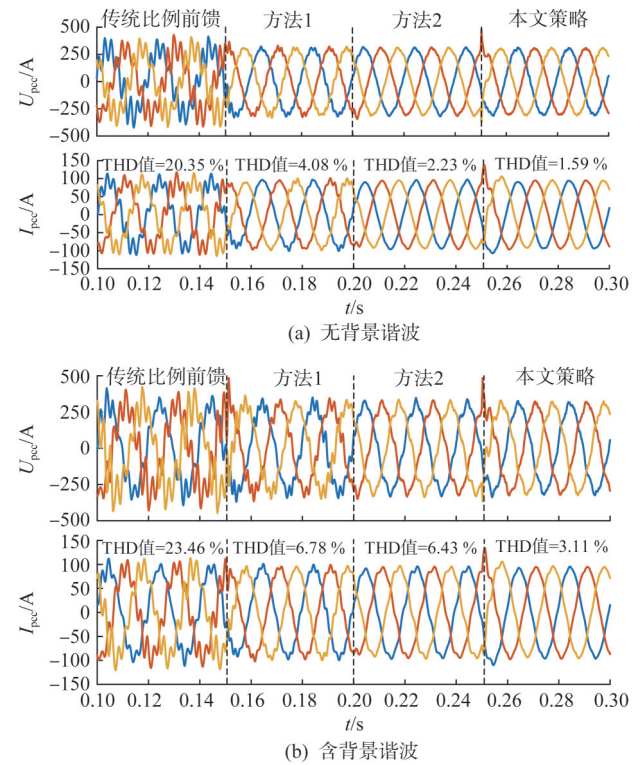


图 20 不同控制策略下逆变器并网波形图

Fig. 20 Waveform diagrams of inverters under different control strategies

在无背景谐波的情况下方法 1、方法 2 与本文方法均能提升系统的稳定裕度。三者的并网电流波形总谐波畸变率(THD)分别为 4.08 %、2.23 % 和 1.59 %, 其中本文方法的并网电流波形质量更优。当电网阻抗较大且电网电压存在背景谐波时, 方法 1 和方法 2 对背景谐波的抑制能力均显不足, 其并网电流中含有与背景谐波频率相同的成分。此时, 方法 1 与方法 2 的并网电流 THD 分别为 6.78 % 和 6.43 %, 而采用本文方法的并网电流 THD 仅为 3.11 %。可见, 所提策略在保证系统稳定性的同时, 具备良好的背景谐波抑制能力, 能够确保在弱电网及存在背景谐波的情况下, 系统拥有更优的并网波形质量。

5 结论

针对弱电网下电网阻抗及背景谐波导致多逆变器并联系统稳定性下降的问题, 本文构建了多逆变器并网系统的阻抗模型, 分析了弱电网环境中电网阻抗及逆变器电网电压前馈环节对多逆变器系统稳

定性的影响机理,并据此提出一种可提升多逆变器系统稳定性的改进控制策略。研究结论如下。

1) 弱电网条件下前馈环节会引入额外的电网电流反馈路径,导致并网逆变器输出阻抗低频段相位降低;逆变器与电网阻抗存在交互作用,电网阻抗的增大将进一步削弱系统稳定裕量,引发谐波振荡,严重时甚至造成系统失稳。

2) 针对弱电网中多逆变器并网系统稳定性下降的问题,通过在电网电压前馈环节引入全通滤波器,可提高各并网逆变器的稳定裕度;同时结合谐波控制器,能增强并网系统对背景谐波的抗干扰能力。理论分析与仿真验证表明,所提策略可有效提升并网逆变器系统在弱电网环境下的适应能力。

参考文献

- [1] 杨明,杨倬,李玉龙,等.高渗透率下基于并网逆变器阻抗重塑的锁相环设计方法[J].电工技术学报,2024,39(2):554-566.
YANG Ming, YANG Zhuo, LI Yulong, et al. A new phase-locked loop design method based on impedance remodeling of grid-connected inverter under high permeability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 554-566.
- [2] 王静茹,张福民,李占凯,等.弱电网下电压源型逆变器锁相环的改进[J].电测与仪表,2022,59(3):187-194.
WANG Jingru, ZHANG Fumin, LI Zhankai, et al. Improvement of phase locked loop of voltage source converter in weak grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 187-194.
- [3] 苏寅生,刘蔚,张野,等.面向高比例新能源并网的多智能体协同自动发电控制算法[J].高压电器,2025,61(5):80-92.
SU Yinsheng, LIU Wei, ZHANG Ye, et al. Multi-agent-cooperative automatic power generation control algorithm for high proportion of new energy grid connection [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 80-92.
- [4] 吴应双,刘蔚,刘明顺,等.规模化新能源接入电网下的多区域协同算法[J].南方电网技术,2025,19(9):174-188.
WU Yingshuang, LIU Wei, LIU Mingshun, et al. Multi-area cooperative algorithm under large-scale new energy access to power grid [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(9): 174-188.
- [5] 汪春江,孙建军,宫金武,等.直驱风机网侧变流器统一建模及其弱电网下稳定性研究[J].电测与仪表,2022,59(10):87-92.
WANG Chunjiang, SUN Jianjun, GONG Jinwu, et al. Unified modeling of generator-side and grid-side converter in direct-drive wind turbines and stability analysis under weak grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 87-92.
- [6] 安军,乔雪婧,王玉鹏.考虑锁相环影响的多逆变器并联接入弱电网稳定性分析[J].电测与仪表,2021,58(8):146-153.
AN Jun, QIAO Xuejing, WANG Yupeng. Stability analysis of multi-inverter parallel access to weak power grid considering the influence of phase-locked loop [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 146-153.
- [7] 张旻,陈新,王昀,等.弱电网下并网逆变器的阻抗相角动态制方法[J].电工技术学报,2017,32(1):97-106.
ZHANG Yang, CHEN Xin, WANG Yun, et al. Impedance-Phased dynamic control method of grid-connected inverters under weak grid condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 97-106.
- [8] 邹常跃,刘邦银,段善旭,等.并网逆变器中数字控制延时对系统稳定性的影响及其优化设计[J].中国电机工程学报,2015,35(2):411-417.
ZOU Changyue, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Influence of delay on system stability and its optimization in grid-connected inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 411-417.
- [9] WANG Y, CHEN Z, WANG X, et al. An estimator-based distributed voltage-predictive control strategy for AC islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3934-3951.
- [10] 曾麟,单周平,陈宏,等.基于粒子群算法的逆变器侧电流反馈的LCL滤波器优化设计[J].南方电网技术,2019,13(2):59-65.
ZENG Lin, SHAN Zhouping, CHEN Hong, et al. Optimal design of LCL filter with inverter-side current feedback based on particle swarm algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(2): 59-65.
- [11] 苗丽芳,王乐媛,曹斌,等.弱电网下电网电压前馈控制分布式逆变系统的谐振阻尼特性分析[J].高电压技术,2020,46(10):3521-3532.
MIAO Lifang, WANG Leyuan, CAO Bin, et al. Resonance damping characteristic analysis of distributed inverter-based system with grid voltage feed-forward control in weak grid [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3521-3532.
- [12] 张声淇,陈冬冬,洪卫东,等.LCL型并网逆变器有源阻尼叠加的控制策略[J].南方电网技术,2024,18(11):1-12,47.
ZHANG Shengqi, CHEN Dongdong, HONG Weidong, et al. Control strategy of active damping superposition for LCL grid-connected inverter [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(11): 1-12, 47.
- [13] 郑晨,周林,解宝,等.基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波抑制策略[J].电工技术学报,2016,31(19):85-96.
ZHENG Chen, ZHOU Lin, XIE Bao, et al. The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 85-96.
- [14] 陈林,徐永海,王天泽,等.弱电网下计及背景谐波的多并网逆变器阻抗重塑谐振抑制方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(1):59-72.
CHEN Lin, XU Yonghai, WANG Tianze, et al. Resonance suppression method for multiple grid-connected inverters with impedance remodeling with background harmonics under weak power grid [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 59-72.
- [15] 范路,李彦哲.弱电网下提高并网逆变器稳定性的相角方法[J].电力电子技术,2018,52(4):46-50.
FAN Lu, LI Yanzhe. Phase angle method to increase inverter stability in weak grid impedance [J]. Power Electronics, 2018, 52(4): 46-50.

- [16] 王渝红, 叶葳, 宋瑞华, 等. 基于阻抗分析法的三相 LCL 型并网逆变器附加有源阻尼设计[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2645 – 2654.
WANG Yuhong, YE Wei, SONG Ruihua, et al. Short-term wind power forecast based on the radial basis function neural network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2645 – 2654.
- [17] 李强, 孙鹏菊, 董光德, 等. 基于模态分析的多逆变器系统串并联谐振特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5269 – 5281.
LI Qiang, SUN Pengju, DONG Guangde, et al. Series-parallel resonance analysis of multi-inverter system based on modal analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5269 – 5281.
- [18] 房国振, 陈武晖, 李柯江, 等. 多逆变器并网系统谐振强度评估及其关键节点阻抗辨识方法[J]. 电网技术, 2025, 49(5): 1962 – 1971.
FANG Guozhen, CHEN Wuhui, LI Kejiang, et al. Resonance strength evaluation and key node impedance identification method for multi-inverter grid-connected systems[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 1962 – 1971.
- [19] 李戎, 李建文, 李永刚, 等. 结合特征根及模态分析法的逆变器多机并网系统谐波扰动响应分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4519 – 4534.
LI Rong, LI Jianwen, LI Yonggang, et al. Analysis of harmonic disturbance response of multi-inverter grid-connected system combining characteristic root and modal analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4519 – 4534.
- [20] 陈博, 曾成碧, 苗虹. 提高并网逆变器在弱电网下稳定性的虚拟阻抗附加相角补偿控制[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 132 – 137.
CHEN Bo, ZENG Chenbi, MIAO Hong. Virtual impedance additional phase angle compensation control to improve the stability of grid-connected inverter in weak grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 132 – 137.
- [21] PENG X, YANG H. Impedance-based stability criterion for the stable evaluation of grid-connected inverter systems with distributed parameter lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 145 – 157.
- [22] 赵铁英, 高宁, 杨杰, 等. 基于 PI 控制器有源阻尼的并网逆变器自适应改进策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 152 – 161.
ZHAO Tieying, GAO Ning, YANG Jie, et al. Adaptive improvement strategy for grid-connected inverter based on active damping of PI controllers[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(5): 152 – 161.
- [23] 刘江, 高淑萍, 孙向东, 等. 弱电网下光伏并网逆变器谐振抑制方法综述[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 65 – 71.
LIU Jiang, GAO Shuping, SUN Xiangdong, et al. Overview of resonance suppression methods for PV grid-connected inverters in weak grid[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 65 – 71.
- [24] 张继勇, 孙宜澎, 杨树德. 一种提高变流器弱电网适应能力的全通前馈方法[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 48 – 55.
ZHANG Jiyong, SUN Yipeng, YANG Shude. All-pass feedforward method for improving the adaptability of converter to weak grid[J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 48 – 55.
- [25] 李志军, 刘洪估, 张家安, 等. 基于频域无源性的并网逆变器前馈相位补偿策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(4): 132 – 139.
LI Zhijun, LIU Hongji, ZHANG Jiaan, et al. Frequency-domain passivity based feed-forward phase compensation strategy for grid connected inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(4): 132 – 139.
- [26] AKHAVAN A, MOHAMMADI H R, VASQUEZ J C, et al. Passivity-based design of plug-and-play current-controlled grid connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 2135 – 2150.
- [27] 汪颖, 罗代军, 肖先勇, 等. 多逆变器并网下的超高次谐振特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 192 – 199.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. Analysis on supraharmonic resonance characteristics with integration of multiple inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 192 – 199.
- [28] AGORRETA J L, BORREGA M, LÓPEZ J, et al. Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 770 – 785.
- [29] 高晓帆, 田书, 常永强. 一种新的大型光伏并网系统稳定性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 26 – 32.
GAO Xiaofan, TIAN Shu, CHANG Yongqiang. A novel stability analysis method for large-scale photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 26 – 32.
- [30] 王毅, 高爱杰, 胡楠, 等. 多并网逆变器并联运行的谐振抑制策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(5): 87 – 96.
WANG Yi, GAO Aijie, HU Nan, et al. Resonance suppression strategy for multi-parallel grid-connected inverters[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(5): 87 – 96.
- [31] WANG J, SUN P, LI B, et al. Analysis of Current Resonance characteristics of multiple grid-connected inverters[C]//2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), November 4 – 7, 2018, Shenzhen, China. New York: IEEE, 2018: 1 – 6.
- [32] FANG T, SHEN S, JIN Y, et al. Robustness investigation of multi-inverter paralleled grid-connected system with LCL-Filter based on the grid-impedance allocation mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14508 – 14524.
- [33] 屠一鸣, 刘进军, 刘增, 等. 基于阻抗的数字延时对单电流环控制型并网逆变器稳定性影响的分析[J]. 电源学报, 2020, 18(2): 63 – 72.
TU Yiming, LIU Jinjun, LIU Zeng, et al. Impedance-based analysis of influences of digital control delay on the stability of single current loop-controlled grid-tied inverter[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(2): 63 – 72.
- [34] 洪芦诚, 徐佳裕, 唐润悦, 等. 三相 LCL 型逆变器序阻抗简化建模方法及并网稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 150 – 157.
HONG Lucheng, XU Jiayu, TANG Runyue, et al. Simplified modeling method of sequence impedance and grid-connected stability analysis for three-phase LCL inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 150 – 157.
- [35] 李建文, 阮筱菲, 李永刚, 等. 弱电网下多并网逆变器谐振失稳研究综述[J]. 现代电力, 2020, 37(2): 187 – 196.
LI Jianwen, RUAN Xiaofei, LI Yonggang, et al. An overview

- on resonance instability of multiple grid-connected inverters in weak grid [J]. Modern Electric Power, 2020, 37 (2): 187 – 196.
- [36] 张成, 赵涛, 朱爱华, 等. 提高弱电网下并网逆变器稳定性的复合补偿策略[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 42 – 47, 76.
ZHANG Chen, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Composite compensation strategy for improving stability of grid connected inverter in weak current network [J]. Smart Power, 2021, 49 (5): 42 – 47, 76.
- [37] 李志军, 张俊杰, 贾杨. 基于自适应有源阻尼的宽频域谐振抑制器[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 95 – 106, 160.
LI Zhijun, ZHANG Junjie, JIA Yang, et al. Wide band resonance suppressor based on adaptive active damping [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18 (10): 95 – 106, 160.

收稿日期: 2024-06-11;网络首发日期:2024-12-02

作者简介:

张世聪(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统分析与控制, shicong_zhang@163.com;

徐永海(1966), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电能质量分析控制、新能源电力系统, yonghaixu@263.net;

陶顺(1972), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为智能配电网与电能质量, tao_shun@sina.com。

(上接第18页 Continued from Page 18)

- CHEN Bin, LIU Yue, LI Qingzhen, et al. Runway temperature hybrid prediction based on MFOA-KELM residual correction under ice and snow[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(11): 2153 – 2164.
- [22] 王文豪, 张宁, 刘法亮, 等. 基于HHT-EWM的雷电波传播类型识别[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 27 – 34, 43.
WANG Wenhao, ZHANG Ning, LIU Faliang, et al. Identification of thunder wave propagation types based on HHT-EWM[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 27 – 34, 43.
- [23] 徐耀松, 唐维, 徐才宝, 等. 基于S变换和PSO-GRNN的柔性直流输电线路故障测距方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 9 – 17.
XU Yaosong, TANG Wei, XU Caibao, et al. Fault location method for VSC-HVDC line based on ST and PSO-GRNN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 9 – 17.

收稿日期: 2024-04-27;网络首发日期:2024-10-19

作者简介:

赵岩(1976), 女, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断, zh_ao_yan@sina.com;

王梓毅(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路短路故障识别与定位, 1806408782@qq.com;

徐天(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压断路器电气故障诊断, 1546759631@qq.com。