

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.01.002

弱电网下多逆变器并网阻抗重塑谐振抑制策略

张世聪, 徐永海, 陶顺, 于荣跃, 张智

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:弱电网下多逆变器并网系统可能同时受到较大电网阻抗及背景谐波影响, 电网阻抗较大导致逆变器与电网交互作用增强从而产生谐振问题, 背景谐波进一步导致并网电压及电流波形畸变, 使系统无法满足并网要求。鉴于此, 文中建立弱电网下多逆变器并网系统阻抗模型, 明确弱电网下并网电流波形畸变及谐振机理, 进而提出一种适用于逆变器的改进电网电压前馈与并联自适应有源阻尼器结合的控制策略。利用改进电网电压前馈重塑多逆变器并网系统阻抗从而抑制背景谐波电压畸变的影响, 利用有源阻尼器合成虚拟电阻以抑制系统与弱电网间的谐振, 当系统工况变化时自适应调节虚拟电阻值并通过虚拟电阻补偿环节进一步改进阻尼效果。仿真结果表明所提策略能有效抑制背景谐波及并网系统谐振, 提高多逆变器并网系统弱电网情况下的适应性。

关键词:弱电网; 背景谐波; 并网逆变器; 电网电压前馈; 阻抗重塑; 有源阻尼器

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)01-0009-11

0 引言

随着我国能源转型战略持续推进, 以光伏、风能为代表的新能源发电技术快速发展^[1-3]。受电力电子设备大量接入及变压器、线路阻抗等因素影响, 配电网逐渐呈现弱电网特征, 主要表现为电网阻抗较大及电网背景谐波含量较高^[4-6]。电网阻抗增大导致逆变器与电网耦合程度增强引发谐振, 而电网电压背景谐波进一步导致并网电压、电流波形畸变^[7-8]。作为新能源发电与电网交直流电能转换的重要接口, 弱电网下逆变器的稳定运行具有重要意义^[9-12]。

为有效降低背景谐波对系统并网电压、电流波形质量的影响, 文献[13-15]通过在电流控制器中增加比例谐振或比例积分量增加控制回路背景谐波频率处的增益, 但其只针对特定频次的背景谐波有效, 电网负荷或运行方式变化时背景谐波频率往往也会波动, 控制器谐波补偿策略对系统运行变化较为敏感^[16]。电网电压前馈是抑制由电网电压畸变引起的并网电流谐波的另一种策略, 通过电压前馈降低逆变器输出导纳幅值实现背景电流谐波抑制, 然而前馈环节引入了额外电网电流反馈路径, 降低了系统稳定性^[17-18]。文献[19]提出基于改进前馈策略提高弱电网下的适应性, 但一定程度上牺牲了背景谐波抑制能力。此外, 随着新能源发电规模扩大, 新能源并网采用多逆变器并联模式, 前馈技术只针对单逆变器的控制策略, 在多逆变器并网系统

中须对每个逆变器实现特定的前馈技术, 增加了经济成本。

针对弱电网下逆变器与电网阻抗耦合导致的谐振现象, 可通过重塑逆变器阻抗及电网阻抗两方面进行谐振抑制。文献[20]提出一种基于谐振监测单元的控制策略, 通过检测谐振频率动态调整逆变器阻抗实现谐振抑制, 然而谐振频率实时检测会增加系统成本与复杂度。文献[21-23]改进并网电流反馈及电网电压前馈实现串并联虚拟阻抗, 重塑逆变器阻抗特性抑制谐振, 但上述策略均未考虑弱电网下背景谐波的影响。文献[24]提出一种改进的加权平均电流有源阻尼方法, 并结合陷波器实现逆变器阻抗重塑, 从而同时抑制背景谐波及逆变器与电网之间的耦合谐振。逆变器阻抗重塑须改变原有逆变器的并网控制策略, 这将增加并网控制策略的复杂性。

针对上述问题, 重塑并网系统阻抗策略得到广泛关注。文献[25]在公共连接点(point of common coupling, PCC)采用并联电力电子变换器作为阻尼装置, 通过模拟虚拟电阻抑制谐振。文献[26]将有源阻尼器运用于多逆变器并联系统中, 但有源阻尼器虚拟电阻值采用直接给定方式, 通用性较差。文献[27-28]进一步提出虚拟电阻值自调节方法, 以并网电压谐波量为参考自适应调节阻值。有源阻尼器目标是阻尼逆变器和电网间谐振, 频率范围主要为600 Hz到3 kHz, 对低频背景谐波抑制能力不足^[29-30]。此外, 阻尼装置的高频环路增益降低会导致有源阻尼器无法准确模拟虚拟阻抗^[31-32]。文献[33]提出并联有源阻尼器结合重塑逆变器导纳实

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52377101)

现背景谐波与并网系统谐振的同时抑制,但其仍未考虑有源阻尼器电流环路增益降低对虚拟电阻的阻尼效果。综上所述,弱电网情况下的多逆变器并网谐振稳定性问题仍有待进一步研究。

文中对弱电网及电网电压畸变背景下多逆变器并网谐振抑制策略展开研究。首先,建立多逆变器系统等效模型,对弱电网下并网电流谐波畸变及谐振机理进行分析。其次,提出一种多逆变器并网系统阻抗重塑谐振抑制策略,基于改进电网电压前馈,在目标逆变器中引入虚拟导纳,实现背景谐波抑制,并通过自适应有源阻尼器抑制谐振。文中所提策略可有效抑制多逆变器并网系统在弱电网宽阻抗范围变化下的谐振,同时保证背景谐波抑制效果。最后,理论分析和仿真验证了文中所提策略的有效性。

1 并网系统建模及谐波畸变与谐振机理

1.1 多逆变器并网系统阻抗建模

LCL 三相并网逆变器结构示意图 1^[34],逆变器采用 $\alpha\beta$ 坐标系下正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 技术及锁相环 (phase locked loop, PLL) 控制方法。其中, U_{dc} 为直流侧电压; I^* 为指令电流 i_{ref}^* 的参考幅值; θ 为电网电压相位角; H_{i1} 为电容电流反馈系数; L_1 为 LCL 滤波器逆变器侧电感; L_2 为电网侧电感; C 为滤波电容; u_g 、 u_{PCC} 分别为电网电压和 PCC 电压; i_g 为并网电流; L_g 为电网电感; H_{i2} 为并网电流反馈系数; $G_i(s)$ 为准比例谐振电流调节器传递函数,其表达式为:

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

式中: K_p 、 K_r 分别为准比例谐振控制器比例系数与谐振系数; ω_i 为截止频率; ω_0 为基波角频率。

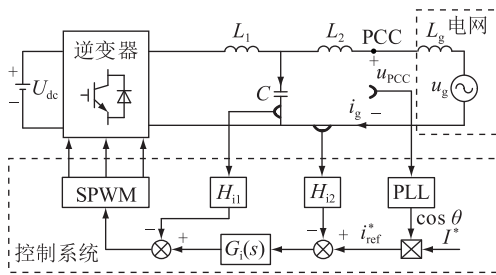


图 1 并网逆变器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of grid-connected inverter

逆变器简化前后控制框图如图 2 所示。其中, i_{ref} 为逆变器参考电流; K_{PWM} 为逆变器 SPWM 环节传递函数的增益值; $G_{x1}(s)$ 、 $G_{x2}(s)$ 分别为控制框图中扰动信号前传递函数与扰动信号后传递函数,

其表达式见式(2)、式(3)。

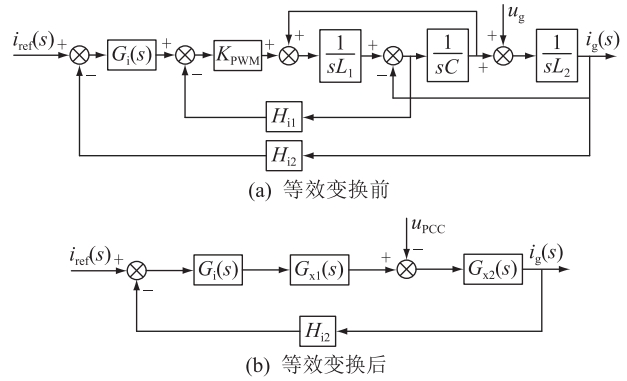


图 2 逆变器等效控制框图

Fig.2 Equivalent control block diagram of inverter

$$G_{x1}(s) = \frac{K_{PWM}}{s^2 L_1 C + s C H_{i1} K_{PWM} + 1} \quad (2)$$

$$G_{x2}(s) = \frac{s^2 L_1 C + s C H_{i1} K_{PWM} + 1}{s^3 L_1 L_2 C + s L_2 C H_{i1} K_{PWM} + s(L_1 + L_2)} \quad (3)$$

使用梅森增益公式,可得并网电流表达式为:

$$i_g(s) = \frac{T_0(s)}{1 + T_0(s)} \frac{1}{H_{i2}} i_{ref} - Y_0(s) u_{PCC} \quad (4)$$

$$T_0(s) = G_i(s) G_{x1}(s) G_{x2}(s) H_{i2} \quad (5)$$

$$Y_0(s) = (s^2 L_1 C + s C H_{i1} K_{PWM} + 1) / [s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_2 C H_{i1} K_{PWM} + s(L_1 + L_2) + G_i(s) H_{i2} K_{PWM}] \quad (6)$$

式中: $T_0(s)$ 为开环传递函数; $Y_0(s)$ 为逆变器输出导纳。

图 3 为单逆变器并网系统等效诺顿模型^[35],其中 Y_1 、 Y_g 分别为线路及电网导纳; $I_1(s)$ 为逆变器等效电流源, $I_1(s) = T_0(s) / [(1 + T_0(s)) H_{i2}]$ 。

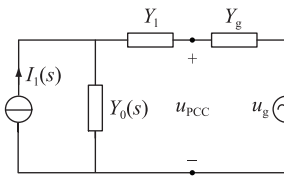


图 3 单逆变器并网系统等效诺顿模型

Fig.3 Equivalent Norton model of grid-connected single inverter system

基于单逆变器并网系统等效电路,多逆变器并联系统等效诺顿模型如图 4 所示,其中 $Y_k(s)$ 、 $I_{s,k}(s)$ 分别为逆变器 k ($k=1, 2, \dots, n$) 的导纳及等效电流源; $Y_{1,k}$ 为逆变器 k 的线路导纳;PCC 节点数为 $n+1$ 。

1.2 谐波畸变与谐振机理

由式(4)可得,逆变器并网电流与 PCC 电压有

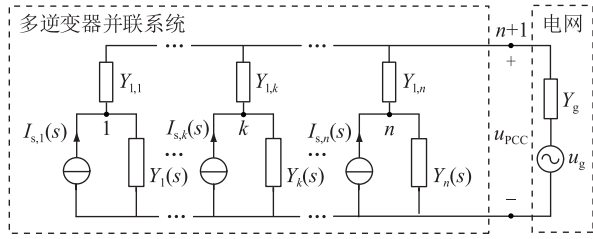


图4 多逆变器并联系统等效诺顿模型

Fig.4 Equivalent Norton model of multi-inverter parallel system

关,弱电网环境下背景谐波会导致并网系统电流畸变。为抑制背景谐波的影响通常采用电网电压前馈策略,通过前馈环节使电流控制器的输入包含并网电流与电网电压两部分,滤波电感端电压含有背景谐波,进而抵消谐波分量对并网电流的影响。图5为增加前馈技术传递函数 $G_f(s)$ 后的逆变器控制框图。

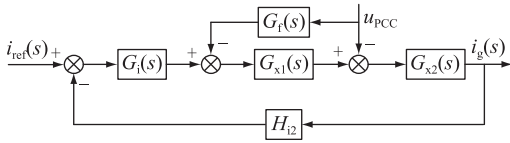


图5 电网电压前馈控制框图

Fig.5 Control block diagram of grid voltage feedforward

通过电网电压前馈技术可在逆变器中等效加入虚拟导纳 $Y_v(s)$,其等效虚拟导纳示意图见图6。

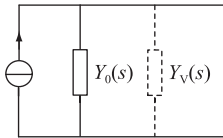


图6 电网电压前馈的等效虚拟导纳示意

Fig.6 Schematic of equivalent virtual admittance of grid voltage feedforward

当逆变器导纳幅值减小时,背景谐波对并网电流影响降低,并网波形质量得到提高。因此可通过并联虚拟导纳使得逆变器导纳最小,此时的电网电压前馈环节传递函数^[36]为:

$$G_f(s) = \frac{1 + sCH_{11}K_{PWM} + s^2L_1C}{K_{PWM}} \quad (7)$$

通过电网电压前馈可抵消背景电压谐波导致的电流波形畸变,改善并网电流质量。由于式(7)中微分项(s 及 s^2)难以实现且可能放大噪声,实际应用中通常仅采用 $1/K_{PWM}$ 比例项前馈。多逆变器并联时须为每个逆变器增加前馈环节。

除电网电压背景谐波含量较高外,弱电网下电网阻抗较大也不容忽视,为便于分析,文中考虑电网阻抗为纯感性情况。当电网阻抗较大时,逆变器

等效输出导纳与电网等效导纳之比需满足稳定判据才能保证系统稳定运行,即逆变器等效输出导纳与电网等效导纳相交时相位裕度为正,相位裕度表达式^[37]如下:

$$P_M = 180^\circ - \angle Y_0(j2\pi f_0) + \angle Y_g(j2\pi f_0) = 180^\circ - \angle Y_0(j2\pi f_0) - 90^\circ = 90^\circ - \angle Y_0(j2\pi f_0) \quad (8)$$

式中: f_0 为交点频率。一般要求 $P_M \geq 30^\circ$,以免因相位裕度不足而引发谐振^[24]。在弱电网环境中,电网阻抗和并网逆变器的数量对系统的稳定性具有重要影响。当电网阻抗较大时,逆变器与电网之间可能发生耦合谐振,而并网逆变器数量的增加则会进一步加剧这种耦合谐振,增加系统发生谐振失稳的风险^[21]。

图7为电网电压前馈策略下,在不同电网导纳下逆变器的输出导纳,逆变器相关参数见表1。弱电网下随着逆变器数量增加及电网阻抗增大,逆变器与电网导纳的幅频特性曲线交点向低频方向移动,系统稳定裕度逐渐降低。稳定性降低会引起并网电流的谐振放大,严重时可能导致并网系统的谐振失稳^[38]。

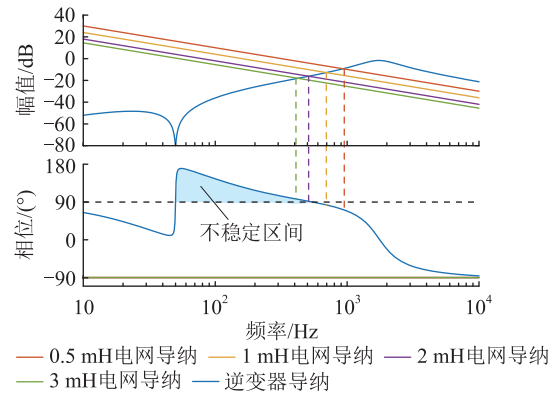


图7 逆变器输出导纳伯德图

Fig.7 Bode diagram of inverter output admittance

表1 逆变器参数

Table 1 Parameters of inverter

参数	数值
电网电压 u_g/V	380
额定功率/(kV·A)	20
逆变器侧电感 L_1/mH	0.8
滤波电容 $C/\mu F$	10
电网侧电感 L_2/mH	0.2
线路电感 L_{line}/mH	0.1
准比例谐振控制器比例系数 K_p	0.68
准比例谐振控制器谐振系数 K_r	85
电容电流反馈系数 H_{11}	0.15
并网电流反馈系数 H_{12}	0.05

2 并网系统阻抗重塑谐振抑制策略

针对弱电网下并网系统与电网阻抗耦合谐振及背景谐波问题,提出一种改进电网电压前馈控制结合自适应有源阻尼器的阻抗重塑策略,通过在目标逆变器上引入虚拟导纳来抑制背景谐波电压畸变,通过有源阻尼器重塑并网系统的输出导纳,从而有效抑制并网系统与电网间的谐振现象。

2.1 改进电网电压前馈

电网电压前馈技术可有效抑制背景谐波的影响,然而,多逆变器系统中各逆变器均采用前馈策略导致系统控制复杂且经济性较差。为此,文中提出一种改进前馈策略,仅在目标逆变器上引入前馈以抵消整个并网系统总导纳,从而抑制背景谐波。图 8 为在目标逆变器 k 引入前馈环节的示意。

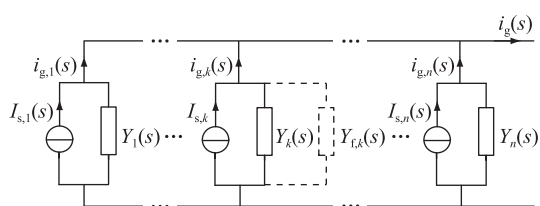


图 8 目标逆变器采用前馈技术后系统等效模型

Fig.8 The system equivalent model of target inverter with the feedforward technique

图 8 中, $Y_{f,k}(s)$ 为逆变器 k 采用前馈技术后引入的等效导纳; $i_{g,k}(s)$ 为逆变器 k 的输出电流。

为使得逆变器并网系统输出导纳达到最小,并联虚拟导纳需满足条件为:

$$Y_{f,k}(s) = - \sum_{k=1}^n Y_k(s) = - Y_T(s) \quad (9)$$

式中: $Y_T(s)$ 为逆变器系统的总导纳。

通过目标逆变器的电网电压前馈,使其前馈环节的等效虚拟导纳等于所有逆变器导纳之和的负导纳。此时并网电流表达式如式(10)所示,并网系统等效模型如图 9 所示。

$$i_g(s) = \sum_{k=1}^n i_{g,k}(s) \quad (10)$$

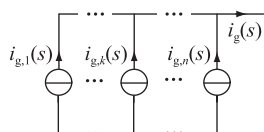


图 9 应用虚拟导纳后系统等效模型

Fig.9 The system equivalent model after applying the virtual admittance

可得此时逆变器并网系统电流不受电网背景电压的影响。为实现上述目标,在目标逆变器 k 的

控制回路引入前馈技术的传递函数 $G_{f2}(s)$ 后逆变器 k 的等效控制框图如图 10 所示。

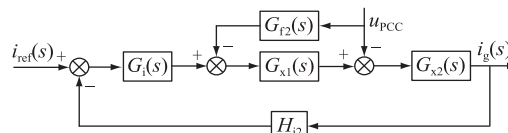


图 10 采用前馈技术的目标逆变器控制框图

Fig.10 Control block diagram of the target inverter with the feedforward technique

应用梅森公式可得目标逆变器输出电流 $i_{g,k}(s)$ 表达式如下:

$$i_{g,k}(s) = I_{s,k}(s) - Y_k(s)u_{PCC} - Y_{f,k}(s)u_{PCC} \quad (11)$$

$$Y_{f,k}(s) = - \frac{G_{f2}(s)G_{x1}(s)G_{x2}(s)}{1 + G_{x1}(s)G_{x2}(s)H_{f2}} \quad (12)$$

联立式(9)与式(12),化简可得:

$$G_{f2}(s) = \frac{\sum_{k=1}^n Y_{f,k}(s)}{Y_{f,k}(s)} G_i(s) \quad (13)$$

文中所提前馈方法不需要针对各逆变器均改变控制策略,有效降低多逆变器并网系统控制策略复杂性及经济成本。目标逆变器应结合实际综合考虑,如选择具有冗余容量的逆变器,以提高系统经济性及系统工况变化下的适应能力。

2.2 自适应有源阻尼器谐振抑制策略

2.2.1 原理及拓扑

根据 1.2 节分析,弱电网下系统稳定裕度降低容易导致谐振失稳,调整改造控制方法以重塑逆变器阻抗的谐振抑制策略在经济性和通用性上较差。为此,文中通过并联自适应有源阻尼器在较宽频域内抑制谐振,具体如图 11 中的虚线框所示,其中, $I_{s,a}(s)$ 为有源阻尼器等效电流源; $Z_{o,a}(s)$ 为有源阻尼器原始端口阻抗; $Z_{v,a}(s)$ 为有源阻尼器虚拟电阻阻抗。

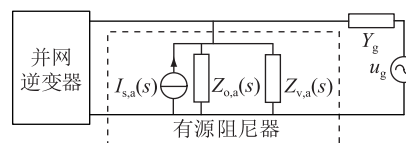


图 11 并联有源阻尼器的并网系统

Fig.11 Grid-connected system with parallel active damper

自适应有源阻尼器并联在 PCC,工作原理与传统的阻性有源滤波器类似,通过模拟虚拟电阻重塑并网系统的等效输出阻抗。有源阻尼器在 $\alpha\beta$ 坐标系下实现,拓扑及控制见图 12,其中下标 abc 和 $\alpha\beta$

分别代表三相坐标系和 $\alpha\beta$ 坐标系下相应值。

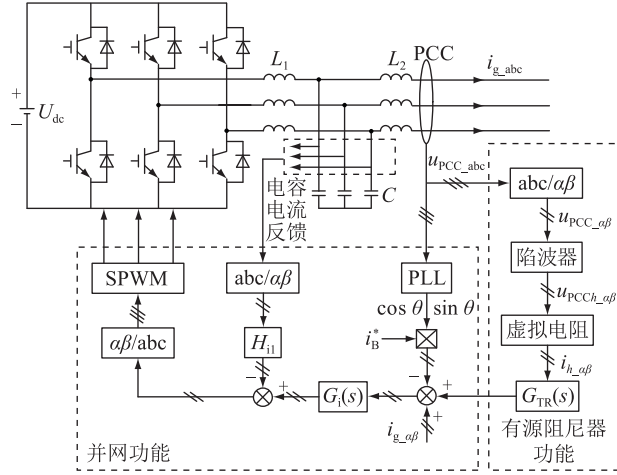


图 12 有源阻尼器结构

Fig.12 Structure of active damper

图 12 中, i_B^* 为基准电流; $G_{TR}(s)$ 为补偿环节; i_{g_abc} 为有源阻尼器三相并网电流; u_{PCC_abc} 、 $u_{PCC_a\beta}$ 分别为三相坐标系与 $\alpha\beta$ 坐标系下的 PCC 电压; $i_{g_a\beta}$ 为有源阻尼器 $\alpha\beta$ 坐标系下的并网电流; $i_{h_a\beta}$ 、 $u_{PCC_h_a\beta}$ 分别为有源阻尼器 $\alpha\beta$ 坐标系下的谐波基准电流和 PCC 电压谐波分量。

有源阻尼器控制框图如图 13 所示。其中, R_V 、 $G_{NA}(s)$ 分别为虚拟电阻给定值和陷波器。

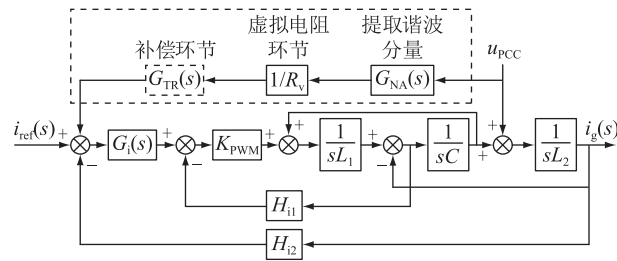


图 13 有源阻尼器控制框图

Fig.13 Control block diagram of active damper

当系统不稳定时,并网逆变器与电网之间的谐振将显著放大 PCC 电压中的谐波分量。为此,有源阻尼器通过陷波器 $G_{NA}(s)$ 过滤并网电压基频分量得到谐波分量 u_{PCC_h} ,根据 u_{PCC_h} 自适应地合成虚拟电阻,从而抑制系统谐振。

由于有源阻尼器与逆变器具有相似的拓扑,因此其环路增益分析方法与 1.1 节一致,环路增益为 $T_A(s)$ 。由此可得出有源阻尼器的输出电流表达式为:

$$i_{g,a}(s) = I_{s,a}(s) - \frac{u_{PCC}}{Z_{o,a}(s)} - \frac{u_{PCC}}{Z_{v,a}(s)} \quad (14)$$

$$Z_{o,a}(s) = \frac{1 + T_A(s)}{G_{x2}(s)} \quad (15)$$

$$Z_{v,a}(s) = \frac{1 + T_A(s)}{T_A(s)} \times \frac{R_V}{G_{NA}(s)} \quad (16)$$

$$G_{NA}(s) = \prod_{h=1,3,5,7} \frac{s^2 + (h\omega_0)^2}{s^2 + sh\omega_0/Q + (h\omega_0)^2} \quad (17)$$

式中: Q 为品质因数。陷波器的作用为消除 PCC 电压的基波分量及低频谐波电压。

电流环路在基波频率处通常增益较高,根据式 (16) 可得,当 $T_A(s)$ 幅频曲线幅值较大时近似认为 $1 + T_A(s) \approx T_A(s)$,虚拟阻抗可等效为纯电阻特性。

2.2.2 控制环节设计

(1) 虚拟电阻自适应调节。文中根据并网电压谐波含量的大小采用虚拟电阻自适应调节算法,如图 14 所示。

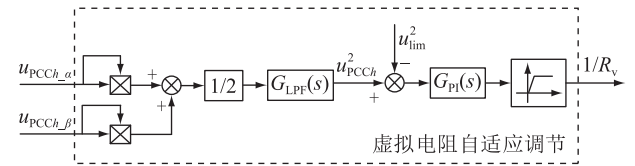


图 14 虚拟电阻自适应调节算法

Fig.14 Adaptive adjusting algorithm of the virtual resistance

将 PCC 谐波电压分量 ($u_{PCC_h_a}$ 、 $u_{PCC_h_B}$) 的平方与消除纹波后预设电压阈值 u_{lim} 的平方相减,然后送入比例积分环节 (其传递函数表达式为 $G_{PI}(s)$),实现无差跟踪,最终经限幅环节输出虚拟电阻的倒数。其中,低通滤波器表达式为:

$$G_{LPF}(s) = \frac{1}{s/(2\pi f_{LPF}) + 1} \quad (18)$$

式中: f_{LPF} 为低通滤波器转折频率,为更好地消除电流信号的脉动分量,文中取 50 Hz。

当弱电网下并网电压波形无法满足要求时,根据并网电压波形畸变情况自适应调节虚拟电阻,以使系统保持 $u_{PCC_h} = u_{lim}$ 。针对 u_{lim} 阈值选取,参考 GB/T 14549—93 规定电网电压 0.38 kV 时,谐波电压总畸变率应小于 5%。因此,阈值选取须考虑标准限值要求,同时留出相应裕度,文中综合考虑将阈值 u_{lim} 设定为 $3\%V_n$, V_n 为电网额定电压有效值。

当系统不稳定导致 $u_{PCC_h} > u_{lim}$ 时,要求在短时间内迅速将 $1/R_V$ 调整到足够大的值抑制谐振,虚拟电阻的动态响应由比例积分控制器的比例环节提供,比例系数 K_{p_R} 为:

$$K_{p_R} = \frac{1/R_V}{u_{PCC_h}^2 - u_{lim}^2} \quad (19)$$

文中比例系数 K_{p_R} 取 2×10^{-4} [39]。比例积分控制器通过积分环节实现参考输入值的零静态误差

跟踪,积分系数 $K_{i,R}$ 为:

$$K_{i,R} = 2\pi f_{LR} K_{p,R} \quad (20)$$

式中: f_{LR} 为控制器转折频率,应低于系统中可能出现的最低谐振频率,文中取 50 Hz。

(2) 并网电流环控制器。有源阻尼器也采用 $\alpha\beta$ 坐标系控制,故电流环控制器功能及原理与并网逆变器类似。为抑制有源阻尼器自身产生的谐波并减小其在背景谐波频率下的导纳,文中提出将带有相位补偿功能的多谐振控制器作为电流环控制器,其传递函数表达式为:

$$G_{HR}(s) = K_{pa} + \sum_{h=1,3,5,7} \frac{A_h \omega_b (s \cos \theta_h - \omega_h \sin \theta_h)}{s^2 + \omega_b s + \omega_h^2} \quad (21)$$

式中: K_{pa} 为电流环控制器的比例环节系数; A_h 为控制器增益系数; ω_b 为带宽; ω_h 为谐振角频率; θ_h 为补偿角度。

相位补偿多谐振控制器能够提高背景谐波频率处增益,降低背景谐波对有源阻尼器的影响,同时避免传统多谐振控制器引入的负相移影响。

(3) 虚拟电阻补偿环节。由图 13 可知考虑虚拟电阻补偿环节后等效阻抗表达式为:

$$Z_{V2}(s) = \frac{T_A(s)}{1 + T_A(s)} \times \frac{R_V}{G_{NA}(s) G_{TR}(s)} \quad (22)$$

式中: $Z_{V2}(s)$ 为加入补偿环节后有源阻尼器的等效虚拟阻抗。

受电流环增益影响,有源阻尼器电阻特性与环路增益相关,当不满足 $1 + T_A(s) \approx T_A(s)$ 条件时,难以保证纯电阻特性,从而影响谐振抑制效果。文中进一步增加虚拟电阻补偿环节 $G_{TR}(s)$,根据式(22)可得,当补偿环节表达式为式(23)时虚拟电阻呈现纯电阻特性。

$$G_{TR}(s) = \frac{T_A(s)}{1 + T_A(s)} \times \frac{1}{G_{NA}(s)} \quad (23)$$

然而式(23)较为复杂,不利于实现,进一步对虚拟电阻补偿环节进行简化^[32]:

① 陷波器及电流控制器仅在较低频段谐波处有影响,在目标阻尼频段处可近似认为陷波器 $G_{NA}(s) = 1$,电流控制器的传递函数表达式近似等于 K_{pa} 。

② 分析不高于 LCL 滤波器谐振频率处的滤波器幅频特性时,可近似忽略滤波电容支路的影响,LCL 滤波器近似呈现为电感特性,虚拟电阻补偿环节可简化为:

$$G_{TR} = \frac{s(L_1 + L_2) + K_{pa} K_{PWM} H_{i2}}{K_{pa} K_{PWM} H_{i2}} \quad (24)$$

由于实际应用中微分环节 s 难以实现,文中提出一阶高通滤波器与比例环节 K 串联等效替代微分环节 s ,等效环节表达式为:

$$F(s) = K \frac{s}{s + K} \quad (25)$$

式中: K 为比例环节, $K = \pi f_s$, f_s 为采样频率。

等效环节与理想微分环节 s 的伯德图如图 15 所示,可得等效环节能够在目标频率范围内较为准确地模拟理想情况下的微分特性。

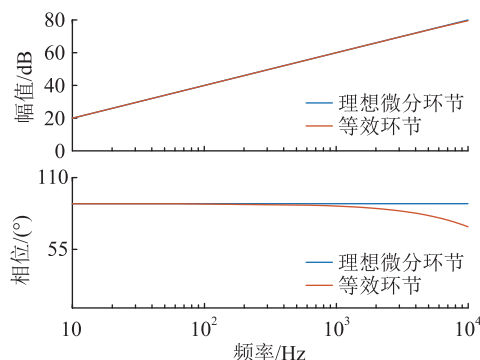


图 15 等效微分环节伯德图

Fig.15 Bode diagram of equivalent differentiation loop

将式(25)代替式(24)中微分环节 s ,结合式(22)可得加入虚拟电阻补偿环节前后有源阻尼装置模拟虚拟电阻的伯德图,如图 16 所示。

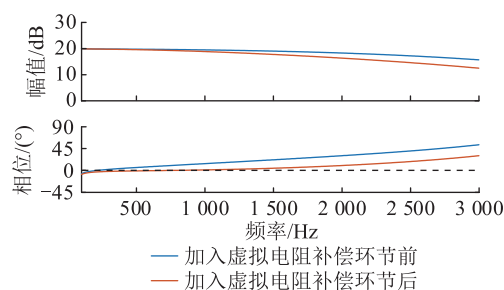


图 16 加入补偿环节前后虚拟电阻伯德图

Fig.16 Bode diagram of the virtual resistance before and after adding compensation element

采用文中策略后虚拟电阻更接近纯电阻特性,并网工作的有源阻尼器在更宽频域具有良好的抑制谐振效果。

3 仿真实验

为验证文中所提出的电网电压前馈与并联自适应有源阻尼器相结合策略的有效性,通过仿真分析在弱电网不同电网阻抗及有无背景谐波情况下的逆变器运行情况,逆变器参数见表 1,有源阻尼器参数见表 2。

3.1 弱电网不同电网阻抗无背景谐波

弱电网在不同电网阻抗情况下并网电压、电流

表 2 有源阻尼器参数

Table 2 Parameters of active damper

参数	数值
逆变器侧电感 L_1/mH	1.2
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	5
电网侧电感 L_2/mH	0.3
额定功率/ $(\text{kV}\cdot\text{A})$	3
准比例谐振控制器比例系数 K_p	3
准比例谐振控制器谐振系数 K_r	100
电容电流反馈系数 H_{11}	3
并网电流反馈系数 H_{12}	1

波形如图 17 所示,其中 THD 为总谐波畸变率。通过调整电网电感 L_g 实现电网阻抗调节,其中, t 处于 0.10 s—0.20 s、0.20 s—0.30 s、0.30 s—0.40 s 时,电网电感 L_g 依次为 0.1、1.5、2.5 mH。随着电网阻抗增加,并网电流 THD 逐渐增加。因为逆变器并网系统稳定裕度降低,逆变器与电网耦合作用增强导致并网电流谐波谐振现象逐渐严重。当 $L_g = 2.5$ mH 时并网电流 THD 达到 28.07%,系统无法稳定运行,与 1.2 节理论分析相符合。

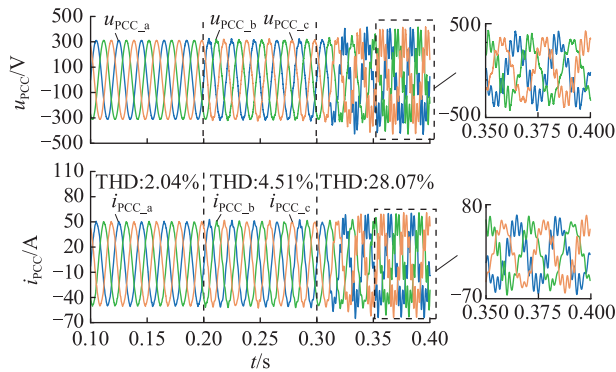


图 17 采用改进策略前的逆变器并网电压、电流波形

Fig.17 Grid-connected voltage and current waveforms of inverter before adopting improved strategy

采用文中所提谐振抑制策略后并网电压、电流波形如图 18 所示。与图 17 相同电网电感变化情况下并网电流 THD 分别为 2.54%、2.84% 及 2.89%,所提策略能够在系统不同工况下维持电压及电流波形质量,并提高并网系统在弱电网下电网阻抗宽范围变化的鲁棒性。

3.2 弱电网较大电网阻抗及背景谐波

随着电力电子设备大量接入电网,实际情况下弱电网中 PCC 电压存在背景谐波,在电网电压中分别加入 2.5% 的 5 次谐波和 1% 的 7 次谐波,进一步验证文中所提策略在弱电网较大电网阻抗及背景谐波存在情况下的适应性。

弱电网 ($L_g = 2$ mH) 且存在背景谐波情况下并

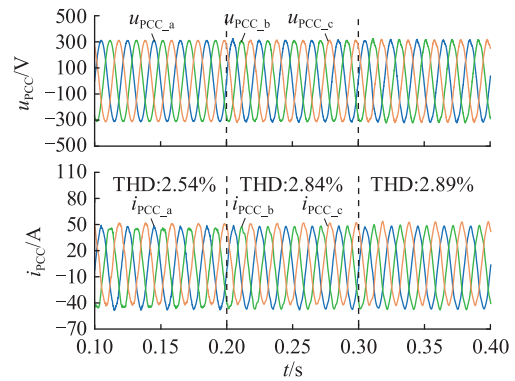


图 18 采用改进策略后的逆变器并网电压、电流波形

Fig.18 Grid-connected voltage and current waveforms of inverter after adopting improved strategy

网电压、电流波形及并网电流频谱如图 19、图 20 所示。此时弱电网较大电网阻抗导致 PCC 电压及并网电流存在明显谐波放大,系统稳定裕度降低,并网波形畸变严重,无法满足并网要求,电流 THD 为 27.08%。

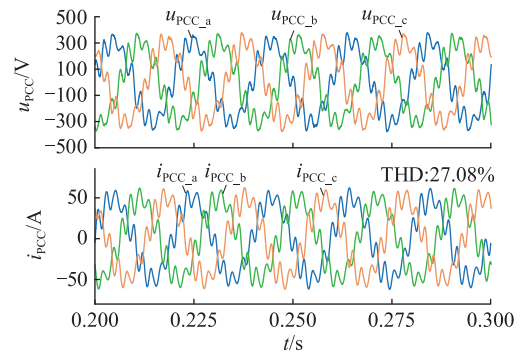


图 19 背景谐波电压下采用改进策略前并网电压、电流波形

Fig.19 Grid-connected voltage and current waveforms under background harmonic voltage before adopting improved strategy

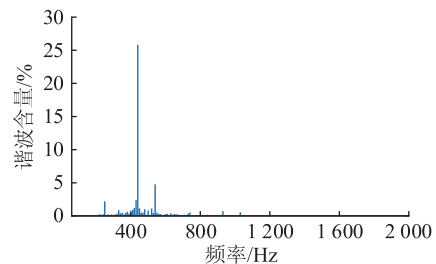


图 20 采用改进策略前并网电流频谱

Fig.20 Grid-connected current harmonic spectra before adopting improved strategy

采用文中策略后并网电压、电流波形及并网电流频谱如图 21、图 22 所示。

此时并网电流 THD 变为 2.69%,文中所提策略对电网电压背景谐波引起的并网电流波形畸变及逆变器与电网间耦合谐振有着良好抑制效果,可有

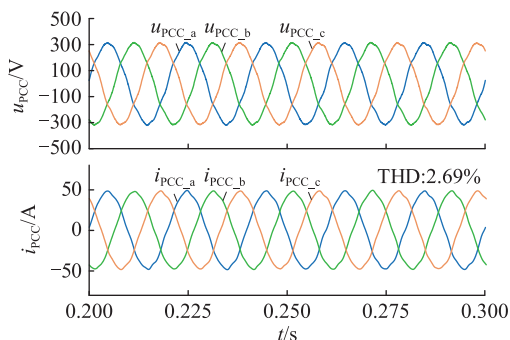


图 21 背景谐波电压下采用改进策略后并网电压、电流波形

Fig.21 Grid-connected voltage and current waveforms under background harmonic voltage after adopting improved strategy

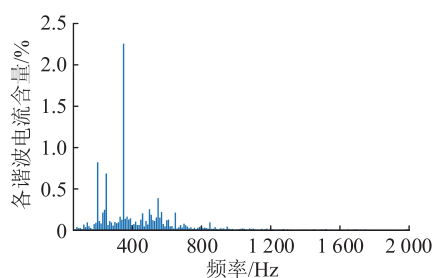


图 22 采用改进策略后并网电流频谱

Fig.22 Grid-connected current harmonic spectra after adopting improved strategy

效改善并网电压、电流波形质量。

3.3 多逆变器并网系统

在多逆变器并网系统情况下进一步验证文中所提策略的并网电压及电流波形改善效果,在电网电感为 1 mH 且含背景谐波情况下进行 3 台逆变器并网仿真。其中在第 1 台逆变器引入改进前馈环节以重塑逆变器导纳实现背景谐波抑制,在 PCC 处并联有源阻尼器以有效抑制系统与弱电网间耦合谐振。采用文中策略前后多逆变器并网电压、电流波形如图 23、图 24 所示。

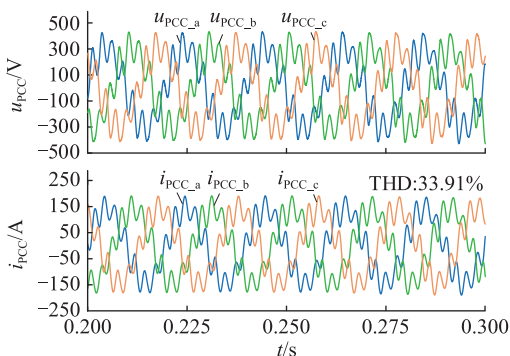


图 23 采用改进策略前多逆变器并网电压、电流波形

Fig.23 Grid-connected voltage and current waveforms of multi-inverters before adopting improved strategy

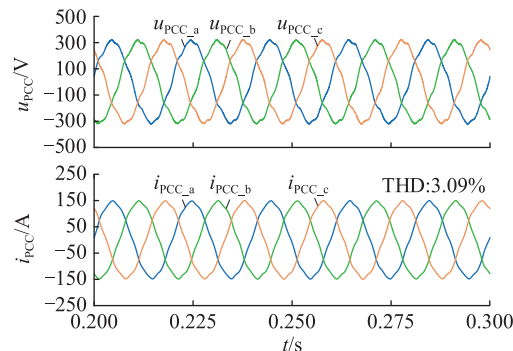


图 24 采用改进策略后多逆变器并网电压、电流波形

Fig.24 Grid-connected voltage and current waveforms of multi-inverters after adopting improved strategy

根据结果可得,相比于单逆变器并网系统,由于逆变器数量增加导致并网系统与电网耦合增强,系统谐振失稳,采用文中策略前并网电流 THD 为 33.91%,无法满足并网要求。采用文中策略后并网电流 THD 降低为 3.09%,所提策略有效抑制系统产生的谐振,同时兼具较好的背景谐波抑制能力。

图 25 为采用文中策略与文献[24]策略后的并网电压、电流波形图。可知,文中策略和文献[24]所提逆变器阻抗重塑策略均可在弱电网及背景谐波条件下有效抑制谐振。然而,与调整所有逆变器的控制策略相比,文中方法显著降低了系统的控制复杂性,展现出更强的通用性。

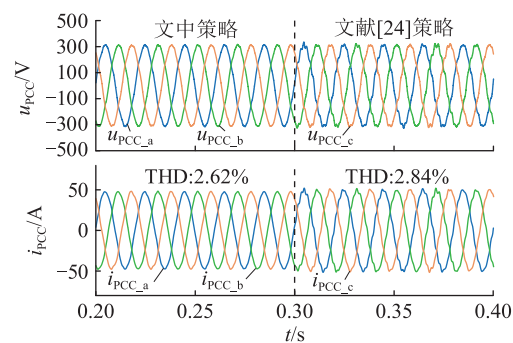


图 25 不同控制策略下并网电压、电流波形

Fig.25 Grid-connected voltage and current waveforms under different control strategies

3.4 文中策略与仅并联有源阻尼器谐振抑制策略对比

为进一步验证文中策略的有效性,在弱电网及背景谐波情况下将文中策略与仅并联有源阻尼器谐振抑制策略进行对比。在 0.3 s 之前仅并联有源阻尼器,0.3 s 之后将控制策略改为并联自适应有源阻尼器结合改进电网电压前馈策略,结果如图 26、图 27 所示。

可得,未添加改进电网电压前馈时并网电流 THD 为 3.30%,5 次和 7 次谐波电流含有率分别为

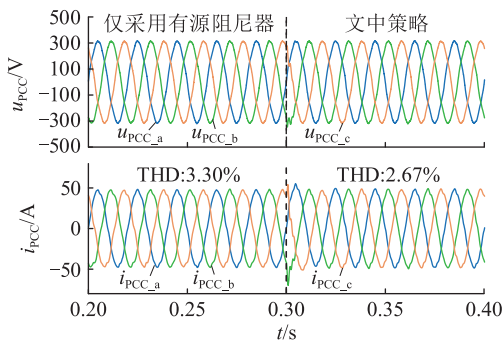


图26 仅采用有源阻尼器与文中策略下的
并网电压、电流波形

Fig.26 Grid-connected voltage and current waveforms with only active damper and the proposed strategy

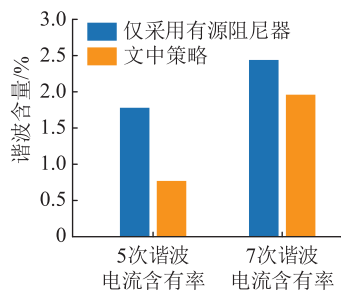


图27 不同控制策略下谐波含量对比

Fig.27 Comparison of harmonic content under different control strategies

1.78%和2.44%。采用文中策略后THD降至2.67%，相应谐波含有率减至0.77%和1.96%。2种方法均能提升并网电流质量，但仅并联有源阻尼器对低频背景谐波引起的畸变抑制能力有限。文中策略能有效弥补此缺陷，确保在弱电网较大电网阻抗和背景谐波条件下系统仍能保持更优异的并网电流波形质量。

4 结论

针对弱电网下多逆变器并网系统电压及电流波形谐波畸变问题，文中建立了多逆变器并网系统阻抗模型，明确弱电网下电网阻抗及背景谐波对并网电压、电流波形质量的影响机理，进而提出一种改进电网电压前馈与并联自适应有源阻尼器结合的控制策略。得到结论如下：

(1) 弱电网下存在背景谐波导致并网电流波形畸变，逆变器与电网阻抗也存在交互影响，电网阻抗增大导致并网系统稳定裕量降低，严重时系统出现谐振失稳。

(2) 针对背景谐波及并网系统与电网的耦合谐振问题，文中所提策略可有效提高多逆变器并网系统在弱电网下的电压、电流波形质量，且兼顾背景

谐波抑制效果。并网电流的THD可保持在3%以下，且5次谐波电流含有率相比于仅并联有源阻尼器降低约50%。

(3) 文中所提策略在不同电网阻抗情况下均可提供稳定的谐振阻尼性能以抑制谐波谐振，使系统满足并网要求，并在弱电网中电网阻抗变化的情况下具有更好的适应性。

参考文献：

- [1] 方天治,张惠丽,沈姝衡,等.弱电网下基于高带宽并网逆变器的并网系统鲁棒性提升技术研究[J].中国电机工程学报,2023,43(14):5583-5595.
- [2] 陈文进,陈菁伟,钱建国,等.气象特征频繁变化区域的光伏功率预测方法[J].浙江电力,2023,42(3):37-46.
- [3] 张焱,郝振波,朱振涛,等.海上风能岸上制氢的经济可行性分析[J].电力建设,2023,44(3):148-154.
- [4] 汪春江,孙建军,宫金武,等.直驱风机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.
- [5] 徐群伟,罗华峰,梅冰笑,等.海上风电场并网对暂态过电压和谐波谐振特性的影响[J].浙江电力,2023,42(2):1-8.
- [6] 晏坤,甘景福,杜鹏,等.光伏并网逆变系统谐波综合分析[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(5):98-107.
- [7] 解润生,张国荣,解宝.考虑长距离输电特性的逆变器并网系统谐波不稳定分析及抑制[J].电力系统自动化,2024,48(2):128-139.

- XIE Runsheng, ZHANG Guorong, XIE Bao. Analysis and suppression of harmonic instability for grid-connected inverter system considering characteristics of long transmission cable [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 128-139.
- [8] 田芫菘, 李建国, 张雅静, 等. 基于无源控制的并网逆变器特定次谐波电流抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 215-222.
- TIAN Yuansong, LI Jianguo, ZHANG Yajing, et al. Selective harmonic current suppression method for grid-connected inverters based on passivity-based control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 215-222.
- [9] 赵磊磊, 牟伟, 宋慧庆, 等. 适用于弱电网的三电平并网逆变器模型预测控制[J]. 浙江电力, 2024, 43(6): 61-68.
- ZHAO Leilei, MU Wei, SONG Huiqing, et al. Model predictive control of three-level grid-connected inverters for weak power grids [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 61-68.
- [10] 任颢, 周鹏鹏. 用于光伏逆变器故障穿越的载波交叠调制优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 167-176.
- REN Jie, ZHOU Pengpeng. Optimization of carrier overlap modulation for fault ride-through of photovoltaic inverters [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 167-176.
- [11] 丁劲松, 姚鸿德, 李圣清. 弱电网下 LCL 型并网逆变器输出阻抗复合重塑策略[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 32-40.
- DING Jinsong, YAO Hongde, LI Shengqing. A study on the complex remodeling strategy of output impedance of LCL-type grid-connected inverters under weak grids [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 32-40.
- [12] ZHUO C R, ZHANG X, SONG W Z, et al. Active resonant damper with control strategy based on inverter output conductance optimization under weak grid conditions [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(3): 2936-2946.
- [13] 朱文杰, 曹晓雅, 李学武, 等. 一种单级式高频隔离光伏并网逆变器及其调制方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 474-485.
- ZHU Wenjie, CAO Xiaoya, LI Xuewu, et al. A single stage high frequency isolated photovoltaic grid-connected inverter and its modulation method [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(7): 474-485.
- [14] 吴强, 周水霜, 李圣清. 基于协调控制的光伏并网谐波抑制策略[J]. 电力电子技术, 2022, 56(8): 76-80.
- WU Qiang, ZHOU Shuishuang, LI Shengqing. Harmonic suppression strategy of photovoltaic grid-connected based on coordinated control [J]. Power Electronics, 2022, 56(8): 76-80.
- [15] 游小杰, 杨才伟, 王剑, 等. 一种适用于机车 PWM 整流器的比例积分-谐振电流控制器设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4926-4936.
- YOU Xiaojie, YANG Caiwei, WANG Jian, et al. A tuning method for proportional integral-resonant current controller in locomotive PWM rectifiers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4926-4936.
- [16] KHAJEH K G, FARAJIZADEH F, SOLATIALKARAN D, et al. A full-feedforward technique to mitigate the grid distortion effect on parallel grid-tied inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 8404-8419.
- [17] ZHENG Z S, ZHANG L, WANG Y M, et al. Full grid voltage feedforward for critical mode LCL-type single-phase grid-tied inverters with physical interpretations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 5283-5295.
- [18] 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.
- [19] WANG C, WANG X, HE Y, et al. A passivity-based weighted proportional-derivative feedforward scheme for grid-connected inverters with enhanced harmonic rejection ability [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 3656-3668.
- [20] 胡伟, 周友斌, 杜镇安, 等. 多并网逆变器系统谐振抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 45-50.
- HU Wei, ZHOU Youbin, DU Zhen'an, et al. Research on resonance suppression strategy of system with multiple grid-connected inverters [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 45-50.
- [21] 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.
- [22] GUO B, ZHANG X, MA H, et al. A series impedance reshaping control method considering PLL dynamics for grid-connected inverters under weak grid conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 4896-4910.
- [23] 王立强, 陶军, 阿敏夫, 等. 抑制新能源并网系统谐振的逆变器阻抗适配支路参数设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 74-83.
- WANG Liqiang, TAO Jun, A Minfu, et al. Parameter design method for the impedance adaptation branch of an inverter to suppress resonance in new energy grid-connected systems [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 74-83.
- [24] 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 in a weak power grid [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 59-72.
- [25] 李志军, 贾杨, 张家安. 基于自适应虚拟电阻的广域有源阻尼器[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023,

- 56(7):755-766.
- LI Zhijun, JIA Yang, ZHANG Jia'an. Wide-area active damper with adaptive virtual resistance[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(7):755-766.
- [26] 于航,李鹏,夏曼,等. 基于有源阻尼器的并联逆变器集群集中式谐振抑制策略[J]. 电测与仪表, 2017, 54(11):71-75.
- YU Hang, LI Peng, XIA Man, et al. A centre resonance mitigation strategy for clustered grid-connected inverters based on active damper[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(11):71-75.
- [27] 张计科,王贵发. 基于阻抗重塑的多并网逆变器并联系统谐振抑制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6):1-7.
- ZHANG Jike, WANG Guifa. Research on the resonance suppression method of the multiple grid-connected inverter parallel system based on impedance remodeling[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6):1-7.
- [28] 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.
- [29] JIA L, RUAN X B, ZHAO W X, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11):9561-9574.
- [30] WANG X F, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7):3318-3329.
- [31] LIN Z H, RUAN X B, ZHANG H, et al. A hybrid-frame control based impedance shaping method to extend the effective damping frequency range of the three-phase adaptive active damper [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1):509-521.
- [32] 阮诗韵,邱彬. 适用于机-网谐振抑制的集中式有源阻尼装置及其控制策略[J/OL]. 电源学报:1-8[2024-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220728.1754.004.html>.
- RUAN Shiyun, QIU Bin. Centralized active damping device suitable for machine-network resonance suppression and its control strategy[J/OL]. Journal of Power Supply:1-8[2024-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220728.1754.004.html>.
- [33] 金国彬,谢飞,李国庆,等. 弱电网且谐波畸变背景下分布式电源并网系统谐振抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5):1-10.
- JIN Guobin, XIE Fei, LI Guoqing, et al. Resonance suppression of a distributed power grid-connected system in a weak grid and with harmonic distortion background [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5):1-10.
- [34] 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):5269-5280.
- 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):5269-5280.
- [35] 郑嘉龙,杨鸽,陈开宇,等. LCL型多逆变器并网系统谐振研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21):177-186.
- ZHENG Jialong, YANG Ge, CHEN Kaiyu, et al. An overview on resonance for a multiple LCL-type inverter grid-connected system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21):177-186.
- [36] XIONG Y K, YE Y Q. Physical interpretations of grid voltage full feedforward for grid-tied inverter [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(2):267-271.
- [37] 肖宁,汤赐,邝翎仪,等. 计及频率耦合的单相并网逆变器阻抗建模及稳定性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1):251-259.
- XIAO Ning, TANG Ci, KUANG Xuyi, et al. Impedance modeling and stability analysis of single-phase grid-connected inverter considering frequency coupling [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1):251-259.
- [38] 张成,赵涛,朱爱华,等. 弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3):224-230.
- ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3):224-230.
- [39] 周琳. 弱电网多并网逆变器环境下有源阻尼器的控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHOU Lin. Research on control method of active damper in weak grid with multiple grid-connected inverters[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

作者简介:



张世聪

张世聪(2000),男,硕士在读,研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:shicong_zhang@163.com);

徐永海(1966),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电能质量分析控制;

陶顺(1972),女,博士,副教授,研究方向为智能配电网与电能质量。

(下转第29页)

Time-varying harmonic impedance estimation based on locally-geographically weighted regression

XU Fangwei¹, XIE Pei'ang¹, WANG Chuan¹, LIU Kai¹, GUO Kai¹, FAN Lijuan²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In existing estimation methods for utility harmonic impedance, it is commonly assumed that the harmonic impedance remains invariant, which often diverges from actual conditions. In practice, both the utility harmonic impedance and background harmonics typically time-varying with operating conditions. For the time interval between two sample points, large numerical value probably gives rise to more conspicuous difference between the impedance and the background harmonics at the corresponding time. Based upon the information of the sample points with a far gap, it is difficult to estimate the impedance value of the sample points of concern. As a consequence, a brand new time-varying utility harmonic impedance estimation method is put forward based on locally-geographically weighted regression. Firstly, a weight matrix is constructed based on time interval, assigning smaller weights to sample points with larger intervals from the points of interest. Locally weighted regression (LWR) is then applied to initially estimate the utility harmonic impedance and background harmonic reference values. Secondly, the impedance reference value is used to modify the regression equation to reduce the under determination of the original regression equation. To screen out the sample points that are similar to the background harmonics of the sample points of concern, the background harmonic reference value is simultaneously utilized as the prior information. On the basis of the screened samples, the background harmonic voltage and the utility harmonic impedance at each point are coped well with by geographically weighted regression (GWR). Under strong background harmonic fluctuations, the recommended method can not only identify abrupt changes in impedance, but also estimate the trend of utility harmonic impedance. Lastly, simulation and case studies demonstrate that the proposed method improves estimation accuracy by approximately 40% compared to traditional constant harmonic impedance estimation methods, and by around 30% compared to existing time-varying impedance estimation methods.

Keywords: harmonic impedance; background harmonic; impedance variation; weight matrix; locally weighted regression (LWR); geographically weighted regression (GWR)

(编辑 吴昊)

(上接第 19 页)

Resonant suppression strategy of impedance remodeling for multi-inverter grid-connected system in weak grid

ZHANG Shicong, XU Yonghai, TAO Shun, YU Yongyue, ZHANG Zhi

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

Abstract: In weak grid, a multi-inverter grid-connected system may be simultaneously affected by large grid impedance and background harmonics. The interaction between inverter and grid is enhanced by the large grid impedance, resulting in resonance problems. Furthermore, the grid-connected voltage and current waveforms are distorted by the background harmonics, which makes the system unable to meet the grid-connected requirements. In view of this, firstly, an impedance model for multi-inverter grid-connected system is established, and the mechanism behind waveform distortion and resonance in weak grid is clarified. Subsequently, a control strategy combining improved grid voltage feedforward with parallel adaptive active damping is proposed. The improved grid voltage feedforward is used to reshape the impedance of the multi-inverter grid-connected system in order to mitigate background harmonics effects, while the active damper is employed to synthesize virtual resistance for suppressing system-grid resonance. When there are changes in working conditions of the system, the damping effect can be further improved by adaptively adjusting virtual resistance values through compensation. Simulation results show that background harmonics and resonance problems can be effectively suppressed by the proposed strategy, and the adaptability of multi-inverter grid-connected systems in weak grid is enhanced.

Keywords: weak grid; background harmonic; grid-connected inverter; grid voltage feedforward; impedance reshaping; active damper

(编辑 吴昊)