

弱电网下基于功率前馈的光伏并网逆变器稳定性分析

刘鑫蕊[†], 孙浩楠, 曹传超, 孙秋野

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 光伏并网逆变器的直流侧电压在光照强度、温度等外界环境的影响下通常是波动的, 这会对弱电网下光伏并网系统的稳定性产生影响. 针对这一问题, 在传统控制系统中引入基于功率前馈的电压控制回路, 并给出其结构和参数的设计过程. 在此基础上, 对光伏并网逆变器的输出阻抗进行建模, 并分析不同控制器下对应的输出阻抗的频率特性, 并利用奈奎斯特稳定性判据, 分析弱电网下光伏并网系统的稳定性. 最后, 通过仿真实验验证所提出控制策略的有效性.

关键词: 光伏并网逆变器; 功率前馈; 阻抗分析法; 频率特性; 弱电网; 稳定性分析

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1565

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 刘鑫蕊, 孙浩楠, 曹传超, 等. 弱电网下基于功率前馈的光伏并网逆变器稳定性分析[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 989-996.

Stability analysis of grid-connected photovoltaic inverter based on power feedforward under weak grid condition

LIU Xin-rui[†], SUN Hao-nan, CAO Chuan-chao, SUN Qiu-ye

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: DC side voltage of grid-connected photovoltaic inverters usually fluctuates under the influence of the external environment such as light intensity and temperature, which will affect the stability of grid-connected photovoltaic systems under the weak current network. To solve this problem, a voltage control loop based on power feedforward is introduced into the traditional control systems, and the design process of its structure and parameters is given. On this basis, the output impedance of the grid-connected photovoltaic inverter is modeled, and the frequency characteristics of the corresponding output impedance under different controllers are analyzed. The stability of the grid-connected photovoltaic system under weak current is analyzed using the Nyquist stability criterion. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation.

Keywords: photovoltaic grid-connected inverter; power feedforward; impedance analysis; frequency characteristic; weak power grid; stability analysis

0 引言

在光伏并网系统中, 逆变器作为连接光伏能源与电网的接口装置, 其控制性能的好坏不仅影响系统输出的电能质量, 还关系着整个系统的安全稳定运行^[1-2]. 针对光伏并网系统, 由于其直流侧电压会随着温度、光照强度等外界因素波动, 传统的控制模型已不能满足其稳定性要求, 而且考虑到光伏发电系统分布散落, 需要大量变压器及较长的输电线路并入大电网, 使得电网呈现弱电网的高阻抗特性, 从而造成控制系统不稳定. 因此, 在弱电网条件下, 考虑直流侧电压扰动的并网逆变器稳定性研究就显得尤为重要^[3].

目前针对并网逆变器稳定性的研究通常采用状态空间方法和阻抗分析方法, 考虑到使用状态空间法时需要逆变器完整的结构和控制器参数, 并且当逆变器结构或参数有变化时, 需要重新建立空间状态模型^[4-5], 因此本文采用阻抗分析的方法对并网逆变器的稳定性进行分析.

现有很多学者使用阻抗分析的方法对并网逆变器的稳定性进行分析. 文献[6]给出用于阻抗分析的并网逆变器稳定性判据, 指出只有在电网阻抗和逆变器输出阻抗的比值满足奈奎斯特稳定性判据时, 并网系统才能稳定. 在此基础上, 文献[7]主要分析了控制

收稿日期: 2020-11-13; 录用日期: 2021-02-10.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N2004013).

[†]通讯作者. E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn.

系统中锁相环对逆变器稳定性的影响,指出逆变器和电网之间的同步稳定性问题可以通过调整锁相环的参数得到改善. 文献[8]在分析具有恒功率负荷的逆变器稳定性时,阐明了电压控制环的带宽会影响逆变器输出阻抗,并给出系统不稳定的原因. 文献[9]详细分析了锁相环、电流控制器参数及滤波器参数对并网逆变器输出阻抗特性的影响. 上述文献独立地研究了各控制环路对逆变器阻抗特性的影响,为逆变器阻抗特性的优化提供了参考. 在此基础上,文献[10]进一步研究了锁相环、电流环和电压环对逆变器输出阻抗特性的影响,指出需要综合考虑不同控制环路才能获得理想的阻抗模型.

文献[11]提出了逆变器与电网连接网络的阻抗建模方法,用于简化大型并网系统的建模,其逆变器的控制结构包括锁相环和电流环. 文献[12]对并网逆变器阻抗进行分析,在进行阻抗建模时,考虑了锁相环、电流环和功率环的影响. 文献[11-12]虽然在阻抗建模时考虑了不同控制环路,却没有考虑直流侧电压波动对系统稳定性的影响. 由于光伏逆变器直流侧电压会随着光照强度等因素发生波动,在进行系统稳定性分析时,考虑直流侧电压波动的影响是十分必要的.

综上,本文在弱电网条件下,提出考虑直流侧扰动的光伏并网逆变器稳定性分析方法,主要贡献在于:

- 1) 在传统并网逆变器控制结构中,引入功率前馈来减小直流侧电压波动并提升系统响应速度;
- 2) 对弱电网下光伏并网系统进行建模,验证了功率前馈的引入可以减小并网逆变器输出阻抗呈现负阻抗特性的频率范围,进而提高系统稳定性.

1 弱电网下光伏并网逆变器结构

图1为光伏并网逆变器控制结构,图中省略了前级升压电路,并以直流电压 v_{dc} 和电流 i_{dc} 表征前级与后级的能量转换关系. i_s 表示逆变器输入电流; C 表示直流侧电容,起到能量缓冲的作用; R_{sw} 代表开关器件的损耗; L 为滤波电感; 弱电网的等效阻抗用 Z_g 表示; 电网电压表示为 u_{abc} ; 公共耦合点处的电压为 e_{abc} ; 并网电流为 i_{abc} . 控制环节包括直流侧电压控制器 (direct-voltage controller, DVC)、交流侧电流控制器 (AC controller, ACC) 和锁相环 (phase-locked loop, PLL).

光伏并网逆变器直流侧电压 v_{dc} 会随光照强度和温度等因素发生波动,波动的电压 v_{dc} 经过外环

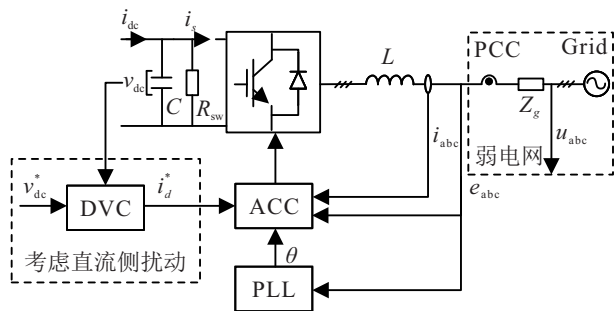


图1 光伏并网逆变器控制结构

DVC 的控制作用,为内环 ACC 提供参考值 i_d^* ,与此同时,PLL 实时获取电网的相位信息,并将其传送到 ACC; ACC 中包含坐标变换环节和相应的控制器,进而实现对并网电流的控制.

2 基于功率前馈的 DVC 控制器设计

2.1 DVC 控制器结构设计

在 dq 轴下,并网逆变器的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = \omega L i_q + v_d - u_d, \\ L \frac{di_q}{dt} = -\omega L i_d + v_q - u_q, \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R_{sw}} = i_s - i_{dc}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: i_d 、 i_q 分别为并网电流的 dq 轴分量, v_d 、 v_q 分别为逆变器输出电压的 dq 轴分量, u_d 、 u_q 分别为 PCC 处电压的 dq 轴分量, ω 为电网角频率. 通常设置 $v_q = 0$, 则 i_q 也为 0, 根据逆变器输入输出端功率守恒可得并网电流 d 轴分量

$$i_d = i_{dc} \frac{2v_{dc}}{3v_d}. \quad (2)$$

根据式(1)和(2),基于功率前馈的并网逆变器双环控制结构如图2所示,图中 $1/k_g = 2v_{dc}/3v_d$,考虑到并网逆变器的控制器延时,引入延时项 $1/(T_i s + 1)$. 传统的电压外环电流内环结构的光伏板输出功率要先通过电压外环才能将信息反馈到电流内环中,而电压外环的响应速度慢,因此在电压外环中引入功率前馈环节,可提高响应速度. 又由于并网电流指令 i_d^* 由外环电压控制指令和功率前馈电流指令相加而成,功率前馈的引入会减小外环电压控制指令的大小,从而减小直流侧电压的稳态误差.

2.2 DVC 控制器的参数选取

图2中电压环和电流环的 PI 控制器参数分别为 k_{pv} 、 k_{iv} 和 k_{pi} 、 k_{ii} . 在选取控制器参数时,忽略延时项的影响,为兼顾系统跟踪性能和抗干扰能力,其开环频率特性应具有充足的相位裕度、适当的中频带宽和截止频率.

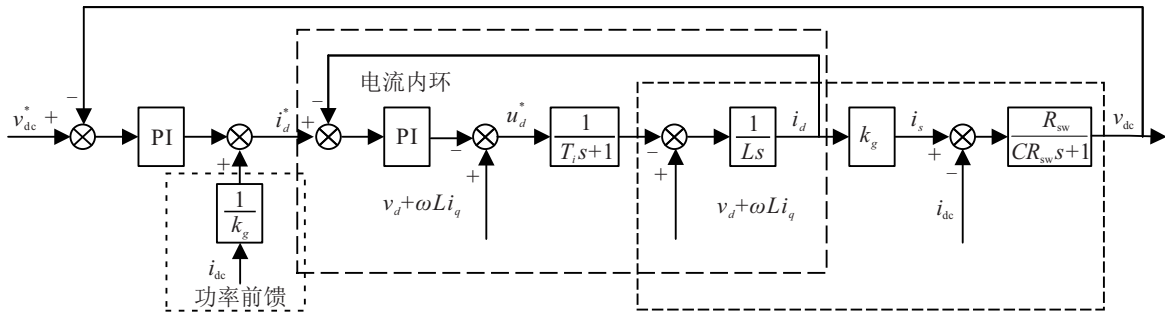
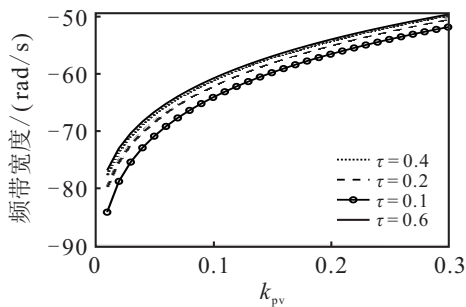


图2 DVC、AVC双环控制结构图

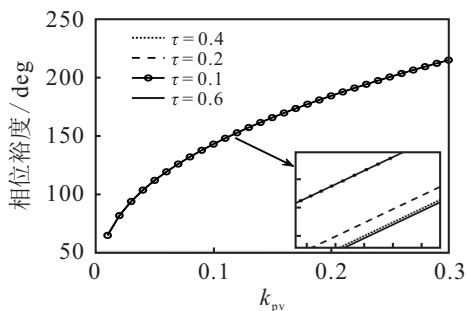
令电压外环时间常数 $\tau = k_{pv}/k_{iv}$, 考虑到电流环的作用是对时间尺度小的电流局部波形进行高频调节, 对应于快速的调节过程; 而电压环则对应时间尺度大的动态过程, 是相对慢速的调节过程^[13]. 因此, 电流环控制参数的灵敏度要小于电压环控制参数及滤波电感的灵敏度. 即电流环参数对系统整体动态特性的影响应小于电压环参数, 所以电压外环时间常数要远大于电流内环时间常数. 本文主要设计引入功率前馈后的电压外环参数, 根据表1所示参数, 即可得到系统相位裕度及频带宽度随控制参数变化的曲线, 如图3所示.

表1 图1中部分参数取值

参数	数值	参数	数值
v_d	179.6 V	C	0.003 3 F
R_{sw}	1 000 Ω	k_{ii}	5 000
L	23 mH	k_{pi}	20



(a) 频带宽度



(b) 相位裕度

图3 控制参数对系统频率特性和带宽的影响

由图3可以看出: 比例增益一定的情况下, 积分增益越大, 系统的相位裕度越大, 带宽越小; 比例增益变化对系统带宽的影响很大, 带宽大表明系统的响应速度快, 跟踪控制信号的能力强, 但同时也意味着系统抑制扰动的能力弱. 为保证系统有足够的带宽和充足的相位裕度, 选取 $\tau = 0.4$, k_{pv} 应在 0.1 ~ 0.2 的范围内, 这里选取 $k_{pv} = 0.12$.

3 光伏并网逆变器输出阻抗建模

本文采用基于 dq 坐标系的线性化建模方法, 在进行阻抗建模时, 用上标 c 表示控制回路变量, 上标 s 表示系统变量. 根据图1得到图4的小信号框图. 图4中, Z_{out} 为无控制作用时的开环输出阻抗矩阵, 有

$$Z_{out} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ls & -\omega L \\ \omega L & Ls \end{bmatrix}. \quad (3)$$

K 为低通滤波器的传递函数矩阵, 可表示为

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} & 0 \\ 0 & \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

G_{del} 为由于控制回路和 PWM 调制而造成的时间延时, 可表示为

$$G_{del} = \begin{bmatrix} \frac{1 - 0.5T_{del}s}{1 + 0.5T_{del}s} & 0 \\ 0 & \frac{1 - 0.5T_{del}s}{1 + 0.5T_{del}s} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

G_{id} 为从占空比 $\vec{d}^s$ 到电感电流 $\vec{i}_L^s$ 的传递函数矩阵^[7], 有

$$G_{id} = \frac{-V_{dc}}{(Ls)^2 + (\omega L)^2} \begin{bmatrix} Ls & \omega L \\ -\omega L & Ls \end{bmatrix}. \quad (6)$$

利用文献[12]中 dq 轴同步旋转坐标系下的 PLL 模型, 得控制回路电压 $\vec{u}^c$ 与系统电压的 $\vec{u}^s$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_d^c \\ \tilde{u}_q^c \end{bmatrix} \approx \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & U_q^s G_{PLL} \\ 0 & 1 - U_d^s G_{PLL} \end{bmatrix}}_{G_{PLL}^u} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于占空比信号有如下关系:

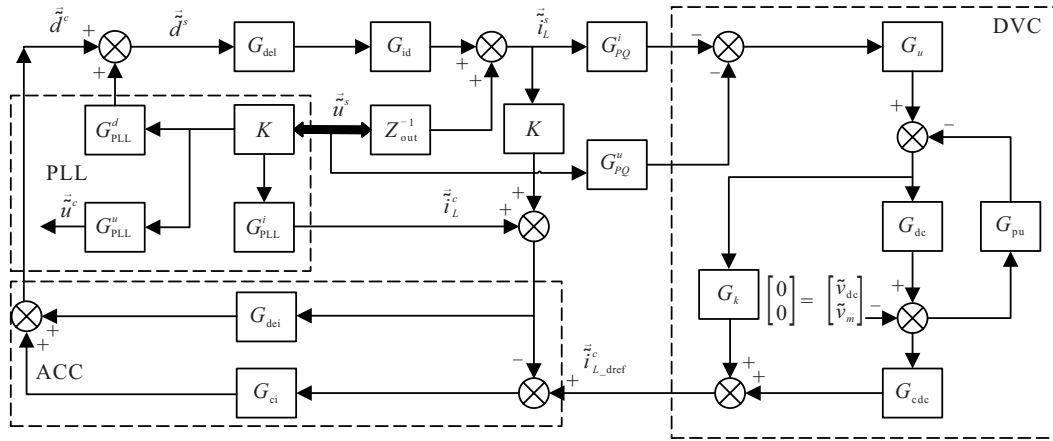


图4 并网逆变器的小信号模型

$$\begin{bmatrix} \tilde{d}_d^s \\ \tilde{d}_q^s \end{bmatrix} \approx \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -D_q^s G_{PLL} \\ 0 & D_d^s G_{PLL} \end{bmatrix}}_{G_{PLL}^d} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{d}_d^c \\ \tilde{d}_q^c \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对于控制回路电感电流矢量有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_d^c \\ \tilde{i}_q^c \end{bmatrix} \approx \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I_q^s G_{PLL} \\ 0 & -I_d^s G_{PLL} \end{bmatrix}}_{G_{PLL}^i} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix}. \quad (9)$$

其中 G_{PLL}^u 、 G_{PLL}^d 和 G_{PLL}^i 分别表征了 PLL 对系统电压、占空比和电流的影响。

图4中的ACC控制回路是通过将系统输出电流 $\tilde{i}_L^s$ 在滤波器 K 和 PLL 的作用下转化为控制回路的电流 $\tilde{i}_L^c$, 再通过 G_{dei} 和 G_{ci} 实现的. 其中前馈解耦环节 G_{dei} 为

$$G_{dei} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{3\omega L}{V_{dc}} \\ \frac{3\omega L}{V_{dc}} & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

电流控制器 G_{ci} 为

$$G_{ci} = \begin{bmatrix} k_{pi} + k_{ii} \frac{1}{s} & 0 \\ 0 & k_{pi} + k_{ii} \frac{1}{s} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

图4中DVC控制回路的作用是维持前后级的功率平衡, 稳定直流侧电压^[14], 其与ACC控制回路共同组成双闭环结构. 忽略开关器件的损耗, 根据光伏并网逆变器前后级有功功率平衡可得方程

$$v_{dc} i_s = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q). \quad (12)$$

对电压矢量 $\tilde{u}^s$ 施加小信号扰动, 得逆变器输出功率 P 和 Q 的方程为

$$P = \underbrace{\frac{3}{2} (U_d I_d + U_q I_q)}_{P_0} + \underbrace{\frac{3}{2} (U_d \tilde{i}_d + U_q \tilde{i}_q + \tilde{u}_d I_d + \tilde{u}_q I_q)}_{\tilde{P}}, \quad (13)$$

$$Q = \underbrace{\frac{3}{2} (U_q I_d - U_d I_q)}_{Q_0} + \underbrace{\frac{3}{2} (U_q \tilde{i}_d - U_d \tilde{i}_q + \tilde{u}_q I_d - \tilde{u}_d I_q)}_{\tilde{Q}}. \quad (14)$$

其中: $\tilde{P}$ 、 $\tilde{Q}$ 可写作矩阵与向量乘积的形式, 即

$$\begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_d & U_q \\ U_q & -U_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_d & I_q \\ -I_q & I_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d \\ \tilde{u}_q \end{bmatrix}. \quad (15)$$

对逆变器输入电流 i_s 有

$$i_s = \frac{P}{v_{dc}}; \quad (16)$$

对 i_s 施加小信号扰动有

$$\tilde{i}_s = \frac{\tilde{P}}{V_{dc}} - \frac{P_0}{V_{dc}^2} \tilde{v}_{dc}. \quad (17)$$

令 $1/V_{dc}$ 为 G_u , P_0/V_{dc}^2 为 G_{pu} . 为便于分析和计算, 定义 v_m 与直流电压 v_{dc} 对应. G_{dc} 代表直流侧电容和开关器件损耗, 有

$$G_{dc} = \begin{bmatrix} \frac{R_{sw}}{(CR_{sw}s + 1)} & 0 \\ 0 & \frac{R_{sw}}{(CR_{sw}s + 1)} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

定义用于功率计算的传递函数矩阵 G_{PQ}^i 和 G_{PQ}^u 为

$$G_{PQ}^i = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_d & U_q \\ U_q & -U_d \end{bmatrix}, \quad G_{PQ}^u = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_d & I_q \\ -I_q & I_d \end{bmatrix}. \quad (19)$$

电压控制器 G_{cdc} 为

$$G_{cdc} = \begin{bmatrix} k_{pv} + k_{iv} \frac{1}{s} & 0 \\ 0 & k_{pv} + k_{iv} \frac{1}{s} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

令功率前馈项 $1/k_g$ 为 G_k , 根据图4可推导出并网逆变器的输出阻抗为

$$Z_{out_dc} = (I + G_{PQ}^i G_u G_{ci} G_{del} G_{id} (G_{dc} G_{cdc} + G_k) +$$

$$\begin{aligned}
& KG_{\text{del}}G_{\text{id}}(G_{\text{ci}} - G_{\text{dei}}) + G_{\text{dc}}G_{\text{pu}}) \times \\
& (-G_{\text{PQ}}^u G_u G_{\text{ci}} G_{\text{del}}G_{\text{id}}(G_{\text{dc}}G_{\text{cdc}} + G_k) - \\
& KG_{\text{PLL}}^i G_{\text{del}}G_{\text{id}}(G_{\text{ci}} - G_{\text{dei}}) + \\
& KG_{\text{PLL}}^d G_{\text{del}}G_{\text{id}} + Z_{\text{out}}^{-1})^{-1}. \quad (21)
\end{aligned}$$

4 光伏并网逆变器输出阻抗分析

本节在前面推导出并网逆变器输出阻抗的基础上,利用表1和表2对并网逆变器输出阻抗的频率特性进行分析。

情形1 无控制作用和PLL作用下的输出阻抗。

图5为并网逆变器在无控制作用下和PLL作用下的输出阻抗频率特性曲线,可见在没有控制器作

表2 图1中其他参数取值

参数	数值	参数	数值
k_{iv}	0.3	i_{dref}	-37 A
k_{pv}	0.12	i_{qref}	0 A
T_{del}	$1.5/f_{\text{sw}}$	f_{sw}	20 kHz

用时, Z_{dd} 与 Z_{qq} 的频率特性曲线相同,表现为正阻抗的频率特性, Z_{dq} 的频率特性曲线为一水平直线,幅值特性和相角特性与工作频率大小无关,其幅值与 Z_{qd} 的幅值大小相等,相位互差 180° 。在PLL作用时, Z_{qq} 表现为负阻抗的频率特性,说明PLL的引入会影响并网逆变器的稳定性。而 Z_{dd} 维持正阻抗的频率特性不变,这是由于PLL的输出角度仅受 q 轴电压影响。

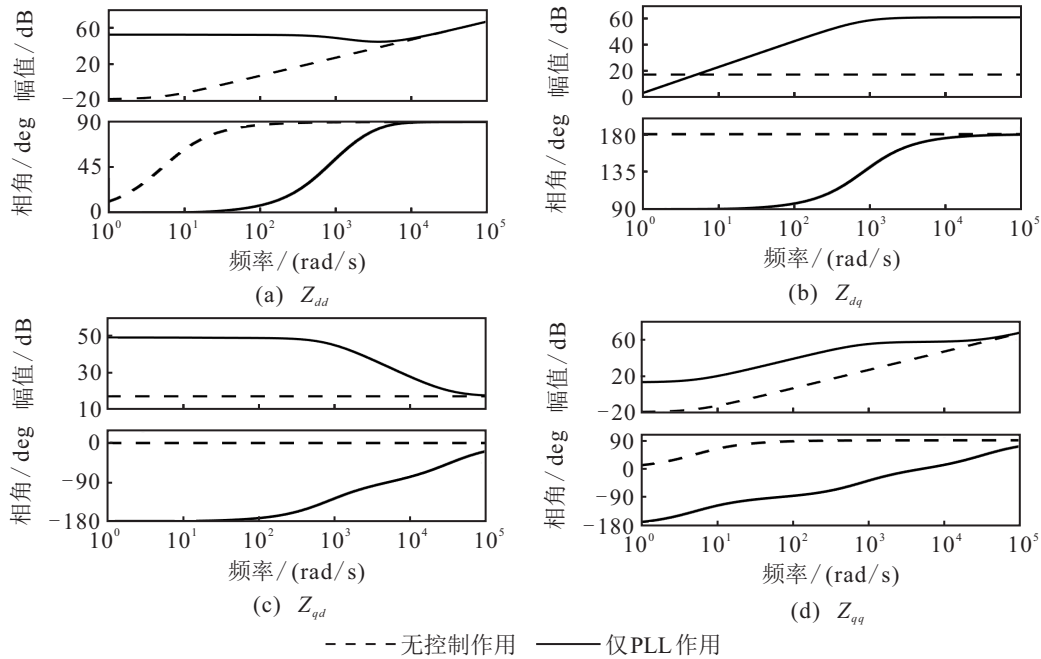


图5 逆变器输出阻抗的频率特性曲线

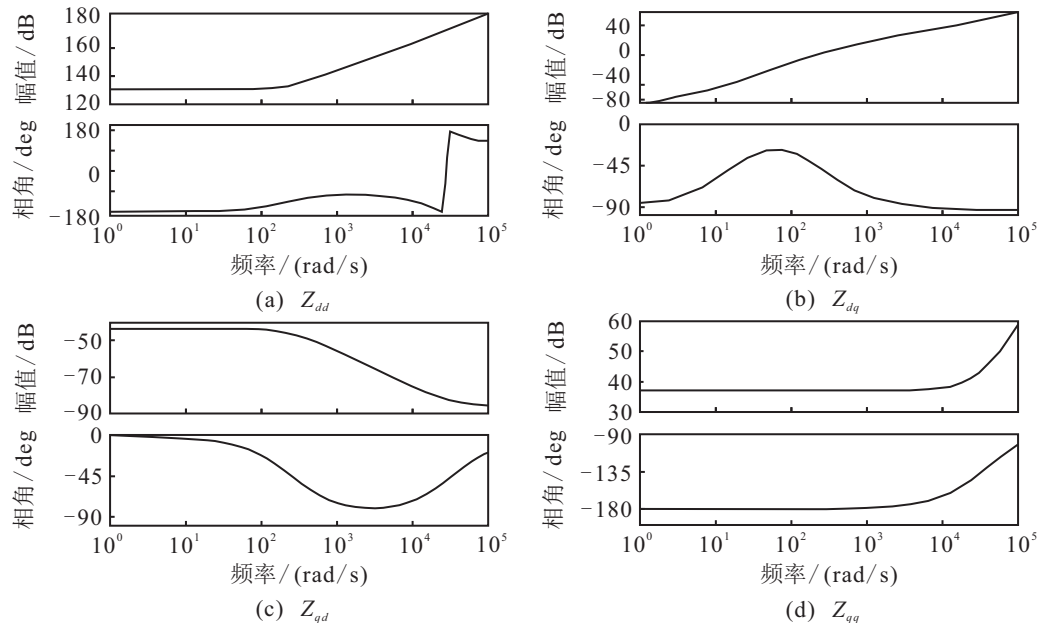


图6 PLL和ACC作用时的频率特性曲线

情形2 PLL和ACC作用下的频率特性.

图6为在情形1基础上加入ACC控制器后的频率特性曲线.对比情形2和情形1可知:在低频段, Z_{dd} 由情形1的正阻抗变为负阻抗特性,这是由于ACC利用PLL输出的角度进行坐标变换,进而将PLL的负面影响引入 d 轴中;而在高频段, Z_{dd} 的频率特性主要受滤波电感的影响, Z_{qq} 则保持负阻抗特性不变.由于前馈解耦和单位功率因数调节的作用, Z_{dq} 和 Z_{qd} 在控制回路带宽范围内的幅值量很小,可以忽略不计^[15].

情形3 PLL、ACC和DVC作用下的频率特性.

图7给出了有锁相环、电压和电流控制作用的并网逆变器输出阻抗 Z_{out_dc} 的频率特性曲线.图7给出的阻抗扫频测量结果显示,测量值与实际值基本吻合,验证了阻抗模型的准确性.对比情形2和情形3可以看出: Z_{dd} 呈现正阻抗的频率特性,说明本文提出的电压外环控制策略可有效消除PLL对 d 轴的负面影响,提高了并网逆变器的稳定性; Z_{dq} 和 Z_{qd} 由于单位功率因数调节的作用在低频段的幅值量很小, Z_{qq} 仍然呈现负阻抗特性.

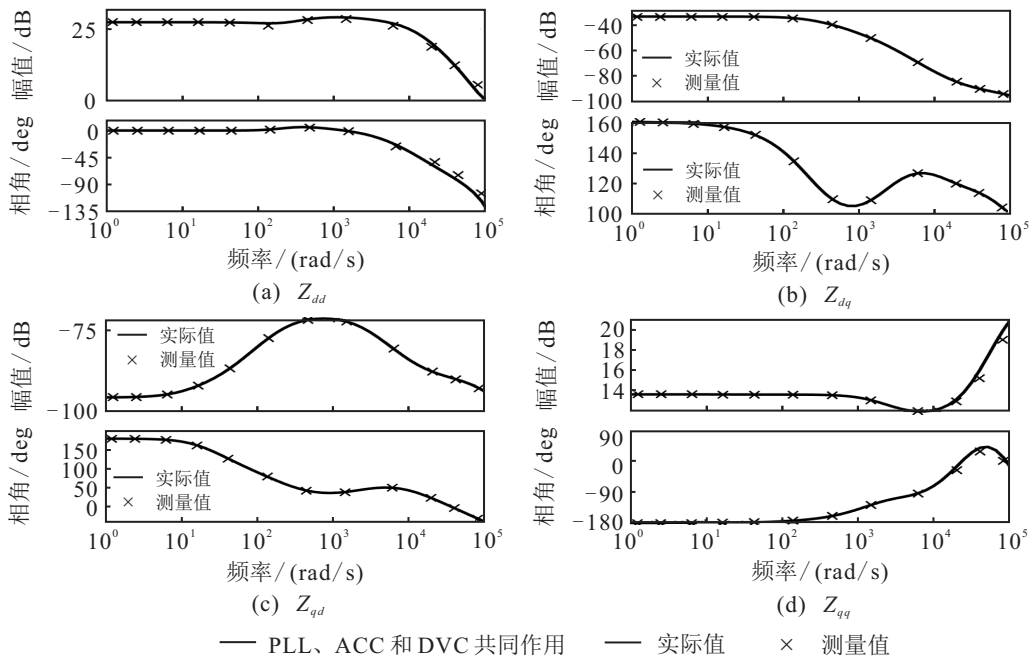


图7 PLL、ACC和DVC作用时的频率特性曲线

图8对比了有无功率前馈下 Z_{qq} 的频率特性曲线,加入功率前馈后 Z_{qq} 呈现负阻抗的频率范围减小,进而说明引入功率前馈会提高系统的稳定性.

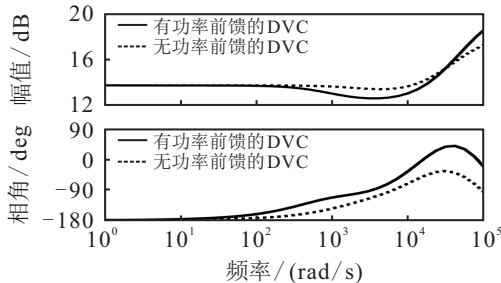


图8 有无功率前馈下的频率特性曲线

5 仿真分析

5.1 弱电网下并网逆变器稳定性判据

并网逆变器与弱电网的交互系统可以看作是一个由电压源和电流源组成的混合系统,其等效电路如图9所示.并网逆变器等效为理想电流源 $I_s(s)$ 与输

出阻抗 $Z_{out_dc}(s)$ 的并联,弱电网等效为理想电压源 $U_g(s)$ 与电网阻抗 $Z_g(s)$ 的串联, $E_{pcc}(s)$ 为公共耦合点的电压, $I(s)$ 为并网电流.由图9可知并网电流 $I(s)$ 的表达式为

$$I(s) = \frac{1}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_{out_dc}(s)}} \left[I_s(s) - \frac{U_g(s)}{Z_{out_dc}(s)} \right] = H_1(s)H_2(s). \quad (22)$$

由式(22)可知,并网系统的稳定性取决于 $H_1(s)$ 、 $H_2(s)$ 两部分,其中 $H_2(s)$ 是在不考虑电网阻抗的情况下得出的.在进行系统稳定性分析时可以假定:在电网空载时,电网电压是稳定的;在电网阻抗为0时,逆变器是稳定的,因此 $H_2(s)$ 是稳定的. $H_1(s)$ 是考虑电网阻抗后,逆变器与电网之间的交互影响部分,可以作为判定并网系统是否稳定的判稳因子.由式(22)和以上假设可知,当电网阻抗和逆变器输出阻抗的比值 $Z_g(s)/Z_{out_dc}(s)$ 满足奈奎斯特稳定判据时,并网

逆变器运行稳定.

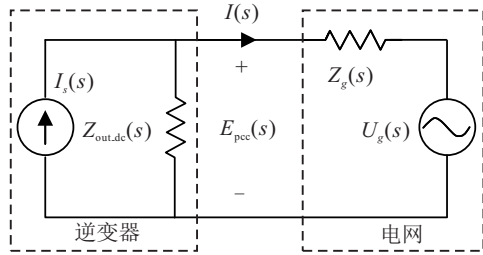


图9 系统的等效电路

5.2 弱电网下并网逆变器稳定性分析

由于电网阻抗中的电阻分量可以提高系统稳定性,考虑电网阻抗中仅含有电感分量的情况.逆变器参数仍按表1和表2进行取值.

图10给出了无电压外环控制下的阻抗比曲线,可以看出随着电网阻抗的增大,阻抗比曲线包含 $(-1, j0)$ 点.说明了弱电网下电网阻抗的增加会使并网系统失稳.

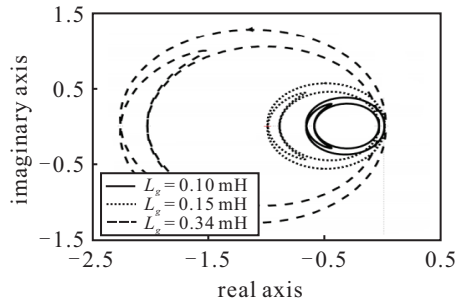


图10 不同电网阻抗的阻抗比曲线

图11对比了有无DVC情况下的阻抗比曲线, L_g 取0.34 mH,可见在没有DVC控制时,阻抗比的奈奎斯特曲线包围 $(-1, j0)$ 点,系统不稳定,而在加入本文提出的基于功率前馈的电压外环后,曲线远离 $(-1, j0)$ 点,系统处于稳定状态,说明本文提出的策略提高了弱电网下并网逆变器的稳定性.

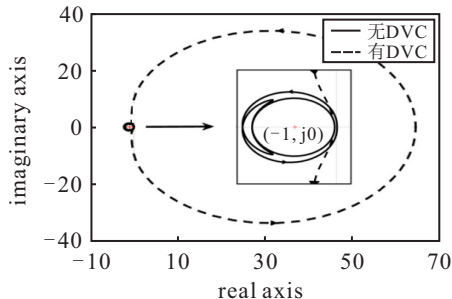
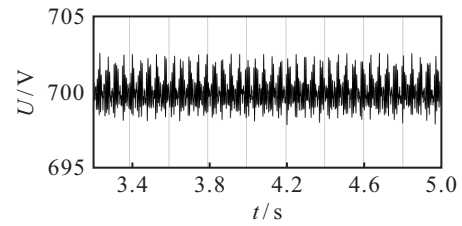


图11 有无DVC下的阻抗比曲线

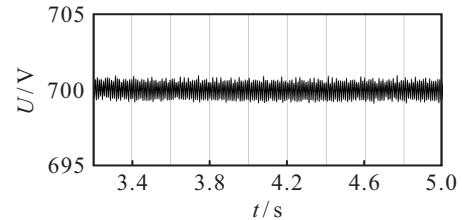
接下来分析验证功率前馈对并网系统的影响.在Matlab/Simulink中搭建并网系统的仿真模型,其逆变器参数及控制参数与表1和表2一致.

图12对比了有无功率前馈情况下,光伏并网系统直流侧电压波动的情况,可见在有功率前馈时,直

流侧的电压波动明显低于没有功率前馈的情况,验证了功率前馈可以有效减小直流侧电压波动.



(a) 无功率前馈



(b) 有功率前馈

图12 有无功率前馈时的直流侧电压

图13对比了光照强度变化时有无功率前馈情况下的并网功率情况,可见在有功率前馈时,并网功率率先达到稳定值,验证了功率前馈可以加快系统响应速度.图13中在有功率前馈时并网功率有轻微的振荡,这是由于在有功率前馈的情况下,引入的直流侧电流量为补偿直流侧电容的能量损失会出现轻微振荡,从而造成并网功率的振荡.

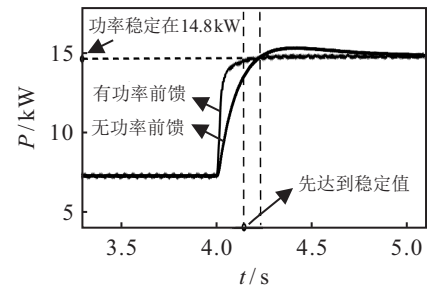
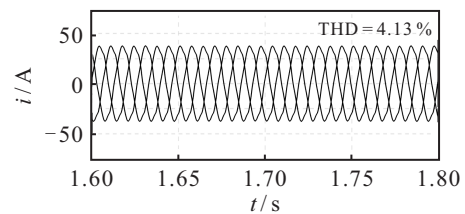
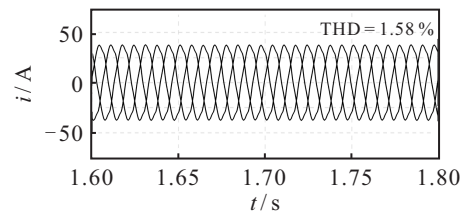


图13 有无功率前馈时的并网功率

图14对比了在 $L_g = 0.15$ mH时有无功率前馈



(a) 无功率前馈



(b) 有功率前馈

图14 有无功率前馈时的并网电流

下的并网电流和其谐波含量,可见在没有功率前馈时,并网电流波形有一些畸变,此时THD为4.13%,而在有功率前馈时并网电流稳定且THD仅为1.58%,进一步说明功率前馈的引入减小了并网电流中的谐波含量,提高了并网系统的稳定性.

6 结论

本文针对光伏并网系统的直流侧电压扰动,在传统控制器的电压外环中引入功率前馈项,建立了基于功率前馈的光伏并网逆变器小信号模型,通过对逆变器输出阻抗频率特性的分析,得出功率前馈的引入会减小 Z_{qq} 呈现出负阻抗的频率范围,进而提高系统的稳定性.随后对 Z_g/Z_{qq} 的奈奎斯特曲线的分析也表明功率前馈的引入提高了系统的稳定性.最后对弱电网下光伏并网系统进行仿真分析,对比了有无功率前馈下的并网电流、并网功率和直流侧电压,实验结果表明在电压外环中引入功率前馈可有效地减小直流侧电压的波动,提高系统的响应速度和稳定性.

参考文献(References)

- [1] Xiao H F. Overview of transformerless photovoltaic grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 533-548.
- [2] 陈鹏伟, 肖湘宁, 陶顺. 直流微网电能质量问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 148-158.
(Chen P W, Xiao X N, Tao S. Discussion on power quality problems for DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 148-158.)
- [3] 高家元, 赵晋斌, 陈晓博, 等. 弱电网条件下基于阻抗的稳定性判据重塑[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2762-2768.
(Gao J Y, Zhao J B, Chen X B, et al. Reconstruction of impedance-based stability criteria in weak grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2762-2768.)
- [4] 陈新, 王赞程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094.
(Chen X, Wang Y C, Gong C Y, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.)
- [5] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 26-32.
(Xie X R, Liu H K, He J B, et al. Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26-32.)
- [6] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [7] Wen B, Dong D, Boroyevich D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 26-38.
- [8] Wen B, Boroyevich D, Burgos R, et al. Small-signal stability analysis of three-phase AC systems in the presence of constant power loads based on measured d-q frame impedances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5952-5963.
- [9] 李奕欣, 赵书强, 马燕峰, 等. 三相LCL型并网逆变器的阻抗建模及特性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 107-113.
(Li Y X, Zhao S Q, Ma Y F, et al. Impedance modeling and characteristic analysis of three-phase LCL-type grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 107-113.)
- [10] Céspedes M, Sun J. Impedance shaping of three-phase grid-parallel voltage-source converters[C]. The 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando, 2012: 754-760.
- [11] Cao W C, Ma Y W, Yang L, et al. D-Q impedance based stability analysis and parameter design of three-phase inverter-based AC power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 6017-6028.
- [12] Wen B, Boroyevich D, Burgos R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [13] 沈欣炜, 郑竞宏, 朱守真, 等. 光伏并网逆变器控制参数的dq轴解耦辨识策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 38-43.
(Shen X W, Zheng J H, Zhu S Z, et al. A dq axis decoupling parameter identification strategy for grid-connected inverter controller of photovoltaic generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 38-43.)
- [14] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [15] Burgos R, Boroyevich D, Wang F, et al. On the AC stability of high power factor three-phase rectifiers[C]. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, 2010: 2047-2054.

作者简介

刘鑫蕊(1981—), 女, 副教授, 博士, 从事电网信息物理系统、配电网故障诊断及自愈控制等研究, E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn;

孙浩楠(1997—), 男, 硕士生, 从事并网逆变器稳定性分析的研究, E-mail: 755322449@qq.com;

曹传超(1995—), 男, 硕士生, 从事并网逆变器稳定性分析的研究, E-mail: 1598085389@qq.com;

孙秋野(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事能源互联网的建模与优化运行、新能源并网运行等研究, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)