

光储微电网逆变器低电压穿越控制策略研究



陈晓歌*

南京工程学院电力工程学院, 江苏南京 211167

摘要: 当配电网受到扰动或发生故障时, 与其连接的微电网会突然脱离配电网进而导致一些严重后果。针对配电网电压跌落时微电网的低电压穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT) 能力, 提出一种基于准谐振控制 (Quasi Proportional Resonant, QPR) 的光储微电网 LVRT 控制策略。光储微电网在电压暂降期间, 通过储能装置消纳直流侧有功功率以维持直流母线电压稳定, 减少换流器注入功率以避免过流; 光伏逆变器采集两相静止坐标系下的并网点电压电流作为外环反馈以及滤波电容电流作为内环反馈, 以提供内部等效虚拟阻抗, 从而为滤波电路提供所需阻尼, 并调制成 PWM 波直接控制交流量以减少谐波分量对光储微电网的影响。最后, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型, 研究表明, 本文所提的控制策略能够有效控制直流母线电压, 限制并网点电流, 证实了该 LVRT 控制策略的合理性。

关键词: 光储微电网; 低电压穿越; 准谐振控制器; 谐波分量

DOI: [10.57237/j.se.2023.01.006](https://doi.org/10.57237/j.se.2023.01.006)

A Low Voltage Ride Through Control Strategy of Optical Storage Microgrid

Xiaoge Chen*

School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China

Abstract: When the distribution network is disturbed or fails, the microgrid connected to it will suddenly leave the distribution network and cause some serious consequences. Aiming at the low voltage ride through (LVRT) capability of the microgrid when the voltage of the distribution network drops, a control strategy of LVRT for the optical storage microgrid based on Quasi-resonant control (QPR) is proposed. During the voltage sag period of the optical storage microgrid, the active power at the DC side is absorbed by the energy-storage device to maintain the voltage stability of the DC bus, and the injection power of the converter is reduced to avoid over-current; The photovoltaic inverter collects the voltage and current at the junction point in the two-phase static coordinate system as the outer loop feedback and the filtered capacitor current as the inner loop feedback to provide the internal equivalent virtual impedance, thus providing the required damping for the filter circuit, and modulates it into a PWM wave to directly control the AC quantity to reduce the impact of the harmonic component on the optical storage microgrid. Finally, the simulation model is built in Matlab/Simulink, The research shows that the control strategy proposed in this paper can effectively maintain the

基金项目: 南京工程学院科研基金项目 (ZKJ202102).

*通信作者: 陈晓歌, 578887476@qq.com

收稿日期: 2023-01-20; 接受日期: 2023-02-16; 在线出版日期: 2023-03-02

<http://www.sciandeng.com>

stability of the DC bus voltage and limit the current of the junction point, which confirms the rationality of the LVRT control strategy.

Keywords: Optical Storage Microgrid; Low Voltage Ride Through (LVRT); Quasi Proportional Resonant; Harmonic Component

1 引言

随着化石能源紧缺以及世界总体环境的逐步恶化,当前以风光为代表的新能源发电的普及已成为不可逆转的趋势,而随着分布式电源渗透率的日益提高,作为一种重要消纳方式,微电网得到了海内外广泛关注[1-3]。当分布式电源的渗透率较小,主网发生故障,并网点电压下降时,光伏系统和风电系统因其容量较小可直接脱网运行,而在高渗透率情况下,新能源发电在电网故障时若仍直接脱网运行,则有可能导致电压崩溃[4-6],因此,能够在短时间内成功实现低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)成为了衡量并网微电网可靠性的重要指标[7-9]。为实现低电压穿越,常见的辅助设备有转子短路保护技术(Crowbar 电路),统一潮流控制器技术(Unified Power Flow Controller, UPFC),以及动态电压恢复器技术(Dynamic Voltage Conditioner, DVR)等。其中,Crowbar 电路成本低,容易实现,但控制容易失效,在低电压穿越期间无法提供动态无功支撑,UPFC 和 DVR 技术复杂且成本高昂[10-12]。更多国内外学者通过研究改进的控制策略以实现低电压穿越,当主网故障,电压跌落时,在保障换流器安全稳定运行的约束条件下按给定的控制项调节有功和无功功率的输出。目前,逆变器控制方式主要分为三类:PI 控制、PR 控制、预测电流控制[13]。

现阶段,针对光伏并网逆变器的研究比较多,当电网电压出现不对称跌落现象时通过派克变换得到的 q 轴分量不仅包含直流量,同时还有倍频分量,锁相作用失

常,PQ 解耦功率控制失效。文献[14]在主网故障时,逆变器采集电流指令并通过 PR 控制器对其进行调节,且其用 PI 控制器调节电压暂降期间网侧电压和逆变器电压间的相位,实现难度较高,恢复过程较慢。文献[15]提出具有功率补偿功能,可对故障过电流进行限制的模型预测直接功率控制,用储能环节调控直流母线电压上的功率,降低逆变器侧谐波畸变率,但对电压跌落深度进行检测时忽视了频率偏移的影响。文献[16]在以单位功率因数运行并网的前提下提出改进的基于一阶惯性滤波正负序分离的锁相控制技术,解决了传统电压跌落深度检测方式因延时产生的误差,提高了 LVRT 能力。文献[17]将滤波电容和虚拟阻抗在 dq 旋转坐标系下并联,输出电压越小,故障电流的参考值就越小,但分布式电源的逆变器故障电流因虚拟阻抗的引入而小于给定值,因此降低系统正常工况下逆变器电压。文献[18]提出混合坐标系下限制故障电流的方法,计及变流器拓扑对分布式电源变流器故障电流的影响,用限制电感电流的手段达到限制其输出电压电流的目的,但当主网发生不对称电压跌落时,此法不能提高各相电流平衡度。

针对大规模光伏并网低电压穿越的研究已有很多,但对微电网低电压穿越能力的研究较少,本文提出一种改进准谐振控制策略,利用准谐振控制器可直接无静差跟踪交流量,且在谐振频率处增益无穷大、响应速度快的特点,抑制输出功率中的倍频谐波分量以实现低电压穿越。

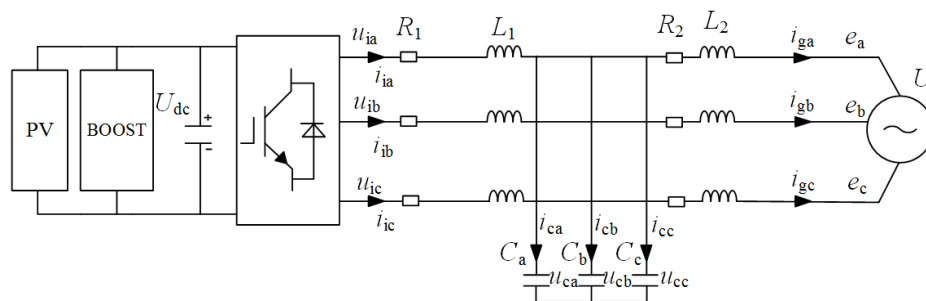


图 1 并网逆变器拓扑结构

2 三相 LCL 型并网逆变器电路拓扑及工作原理

拓扑结构如图 1 所示。整个系统由光伏阵列 PV、BOOST 电路、逆变电路、控制系统和 LCL 滤波器组成, 其中 U_{dc} 为理想直流电源, u_{ia} 、 u_{ib} 、 u_{ic} 和 i_{ia} 、 i_{ib} 、 i_{ic} 分别为逆变器输出三相电压和电流, e_a 、 e_b 、 e_c 分别为三相电网电压, i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 分别为三相并网电流, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为三相滤波电容电流。三相并网逆变器由 PWM 信号触发调制, 以此将直流侧电压逆变为三相交流电压, 再由 LCL 型滤波器对电压在开关频率处产生的谐波进行滤波, 使谐波畸变率达到国家标准, 其中 L_1 、 L_2 为滤波电感, C 为滤波电容。

根据基尔霍夫定律得到式(1):

$$\begin{cases} u_{ix} - u_{cx} = L_1 \frac{di_{ix}}{dt} \\ u_{cx} - e_x = L_2 \frac{di_{gx}}{dt} \\ i_{ix} - i_{gx} = i_{cx} \\ i_{cx} = C \frac{du_{cx}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)为三相 LCL 型逆变器在三相静止 abc 坐标系下的数学模型, x 代表 a、b、c 三相中的某一相, 假定

a 轴与 α 轴重合, 则 $\alpha\beta$ 坐标系下等效数学模型如式(2)所示:

$$\begin{cases} L_1 \begin{bmatrix} \frac{di_{i\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{i\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} \\ L_2 \begin{bmatrix} \frac{di_{g\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{g\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix} \\ C \begin{bmatrix} \frac{du_{c\alpha}}{dt} \\ \frac{du_{c\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{i\alpha} \\ i_{i\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{g\alpha} \\ i_{g\beta} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

得到网侧电流 i_{gx} 与逆变器输出电压 u_{ix} 简化后的传递函数如式(3)所示:

$$G_{LCL}(s) = \frac{i_{gx}(s)}{u_{ix}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (3)$$

取 $L_1=6\text{mH}$, $L_2=3\text{mH}$, $C=10\mu\text{F}$, 代入式(3)并绘出其波图, 如图 2 所示。

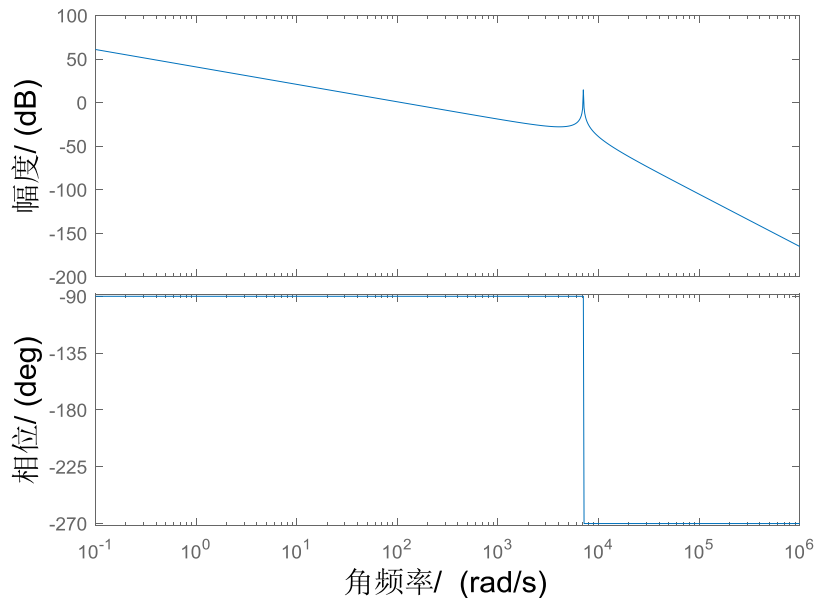


图 2 LCL 型滤波器频率特性

由图 2 可以发现, LCL 型滤波器在高频段增益较大, 有明显的衰减效果, 因此, LCL 型滤波器常应用于高频率并网逆变电路中。

3 低电压穿越控制策略

3.1 直流侧 DC-DC 升压电路控制

实际情况下,当光照强度较小,环境温度较低时,光伏阵列(PV)输入电压往往达不到相关标准,无法直接并网,当光照强度和温度条件不同时,光伏电池最大功率点也不相同,而光伏发电系统应在最大功率条件下运行,因此,本文在直流侧 BOOST 电路采用观测扰动法跟踪最大功率点,通过储能设备消纳直流侧有功功率以维持直流母线电压稳定,减少换流器注入功率以避免过流。

储能系统采用电压外环,电流内环双环控制策略,其控制框图如图 3 所示。利用直流母线电压 U_{dc} 与其参考值的差值,经 PI 控制器调节后得到的储能电流参考值与储能电流做差,再将经 PI 控制器调节得到的参考电压调制为 PWM 波,作为 IGBT 的驱动信号。

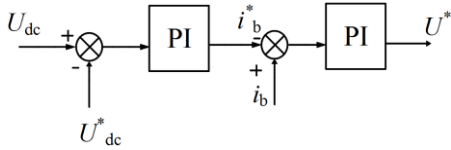


图 3 储能系统控制框图

3.2 交流侧 DC-AC 逆变器控制策略

由于采用 LCL 型滤波器,变流器在谐振频率处存在谐振尖峰问题,导致系统不稳定,对此,本文采用的控制策略提取电容电流作为电流内环反馈,利用其有源阻尼,在无外增无源元件、保持系统功率损耗不变的条件下增大系统阻尼从而抑制谐振尖峰的危害。

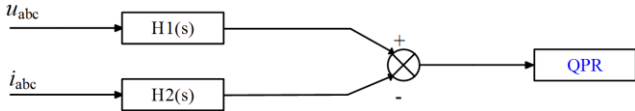


图 4 三相 LCL 并网逆变器控制结构图

常规 PI 控制器在电网电压扰动时跟踪性能变差,必须引入网侧电压前馈以消除干扰,从而使得系统更加复杂、难以获得理想控制效果,而且在电网电压发生不对称故障时,PI 控制器需分别建立正负序控制环以控制不对称电流。而谐振控制器可在不存在交叉耦合项的条件下同时控制正负序两相电流,且计算量低、易于控制。因此,逆变器侧采用准谐振控制(QPR),其故障穿越控制结构如图 4 所示,提取三相并网电流以及滤波电容电流并通过 Clark 变换将其转换为两相

静止坐标系下 α 轴和 β 轴分量,通过 α 轴电网电流参考值 i_{α}^* 与 α 轴电网电流 i_{α} 作差再经 QPR 环节得到 α 轴电容电流参考值 i_{ca}^* ,之后调制 PWM 触发信号驱动并网逆变器工作。

为了降低由于电网侧发生不对称暂降故障而产生的高次谐波,由 H1(s) 得到三相电流在两相静止坐标系下的参考值,进而实现对有功和无功功率的解耦控制,为低电压穿越的实现提供保障。其电流参考值如式(4)所示。

$$\begin{cases} i_{\alpha}^* = \frac{p^* E_{\alpha} + q^* E_{\beta}}{E_{\alpha}^2 + E_{\beta}^2} \\ i_{\beta}^* = \frac{p^* E_{\beta} - q^* E_{\alpha}}{E_{\alpha}^2 + E_{\beta}^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中, p^* 为逆变器输出有功功率参考值, q^* 为逆变器输出无功功率参考值, E_{α} , E_{β} 分别为电网电压在 α 轴, β 轴上的分量。

H2(s) 是获得三相电流在两相静止坐标系下电流的过程,所用到的变换矩阵如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

准谐振控制器的控制函数如式(6)所示:

$$F_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (6)$$

式中, K_p 是该控制器的比例增益, K_r 是谐振参数; $\omega_0=314\text{rad/s}$, 为工频角频率。

控制器在该谐振频率处幅频特性趋向无穷大,因此可零稳态误差控制交流流量。

ω_c 与系统带宽成正比,选取合适的带宽可降低电网故障时系统灵敏度,保证系统平稳运行,使其具有较好鲁棒性。对于 ω_c 的取值,首先令 $K_p=0$,再代入 $s=j\omega$ 到式(6)中,得式(7):

$$\begin{aligned} F_{PR}(j\omega) &= \frac{2K_r \omega_c j\omega}{-\omega^2 + 2\omega_c j\omega + \omega_0^2} \\ &= \frac{K_r}{1 + j \frac{\omega_0^2}{2\omega_c} (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})} \\ &= \frac{K_r}{1 + jQ(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, Q 为品质因数。

由于

$$F_{PR}(j\omega) = \frac{K_r}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

可得:

$$\left| Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \right| = 1 \quad (9)$$

进一步计算控制器带宽, 可得:

$$BW = \frac{\omega_o}{2\pi Q} = \frac{\omega_c}{\pi} \quad (10)$$

本文假设允许频率波动范围 $\pm 0.5\text{Hz}$, 则带宽 $BW=1$, $\omega_c = \pm\pi$ 。

式(11)为采用电容电流作为内环控制反馈的传递

函数:

$$\frac{i_g(s)}{i_c(s)} = \frac{K_c K_{PWM}}{L_1 L_2 C s^3 + K_c K_{PWM} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (11)$$

式中, i_c 为电容电流, i_g 为电网电流, K_c 为电流环比例, 取 1; K_{PWM} 为脉冲宽度调制发生器比例系数, 取 1。

在有电容电流内环反馈的条件下, 系统极点在左半平面, 系统稳定, 再由式(11)绘制其波特图, 如图 5 所示, 无电容电流反馈时, 谐振尖峰突出, 系统不稳定, 容易导致低电压穿越失败。有电容电流反馈时由于增加了阻尼, 谐振频率处的谐振尖峰问题得以解决。此外, 取电流环比例 K_c 分别为 10 及 100, 可以从图 5 中看出抑制效果与 K_c 成正比, 但系统调节时间也与之成正比, 相位裕度与之成反比, 因此必须根据实际需要合理选择 K_c 的值, 本文取 $K_c=1.2$ 。

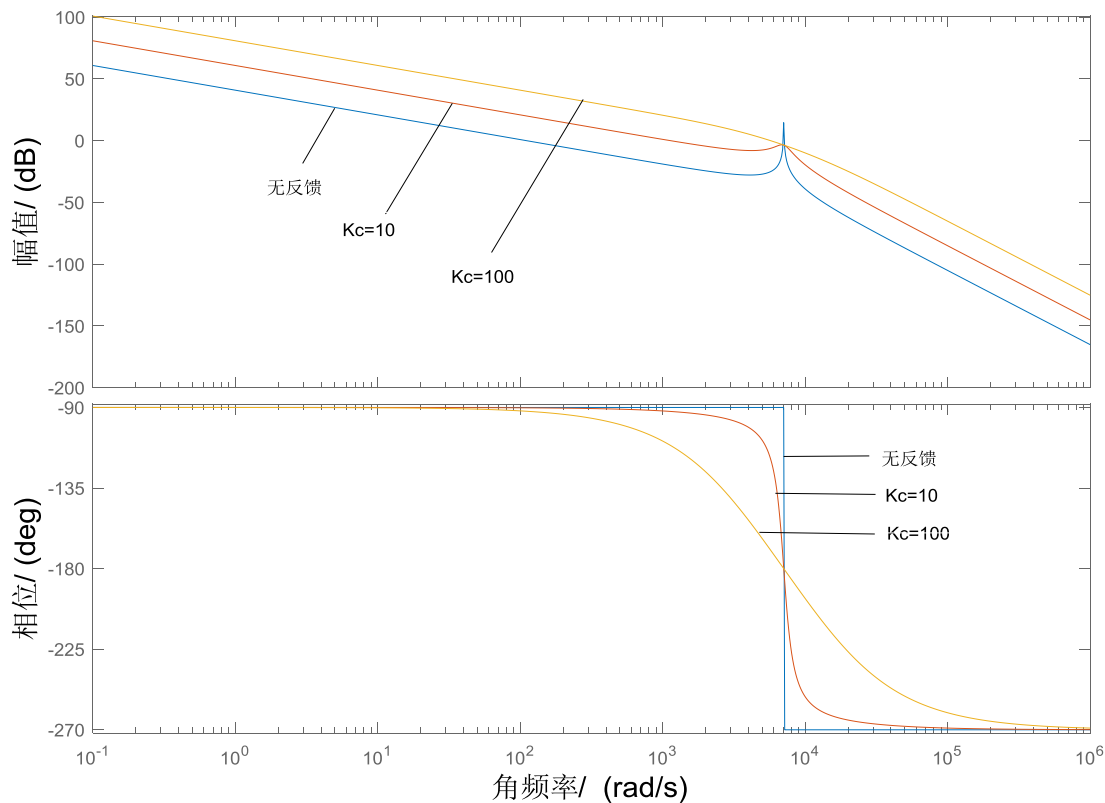


图 5 有电容电流反馈和无电容电流反馈系统的波特图

在准谐振控制器中 K_p 和 K_r 的数值大小会影响具体控制效果, 取以下三种情况: $K_p=1$, $K_r=100$; $K_p=1$, $K_r=1000$; $K_p=2$, $K_r=100$, 绘制其波特图, 如图 6 所示。

根据图 6 分析不同控制参数下的准谐振控制的幅频、相频特性可知: 相位裕度、低频幅值、高频幅值

与 K_p 的取值成正比, 峰值增益与 K_r 的取值成正比。因此, 对于控制器 K_p , K_r 选取合适的数值可准确、快速匹配系统, 本文取 $K_p=0.5$, $K_r=100$ 。选取电网电压为扰动量, 得到 QPR 控制框图, 如图 7 所示。

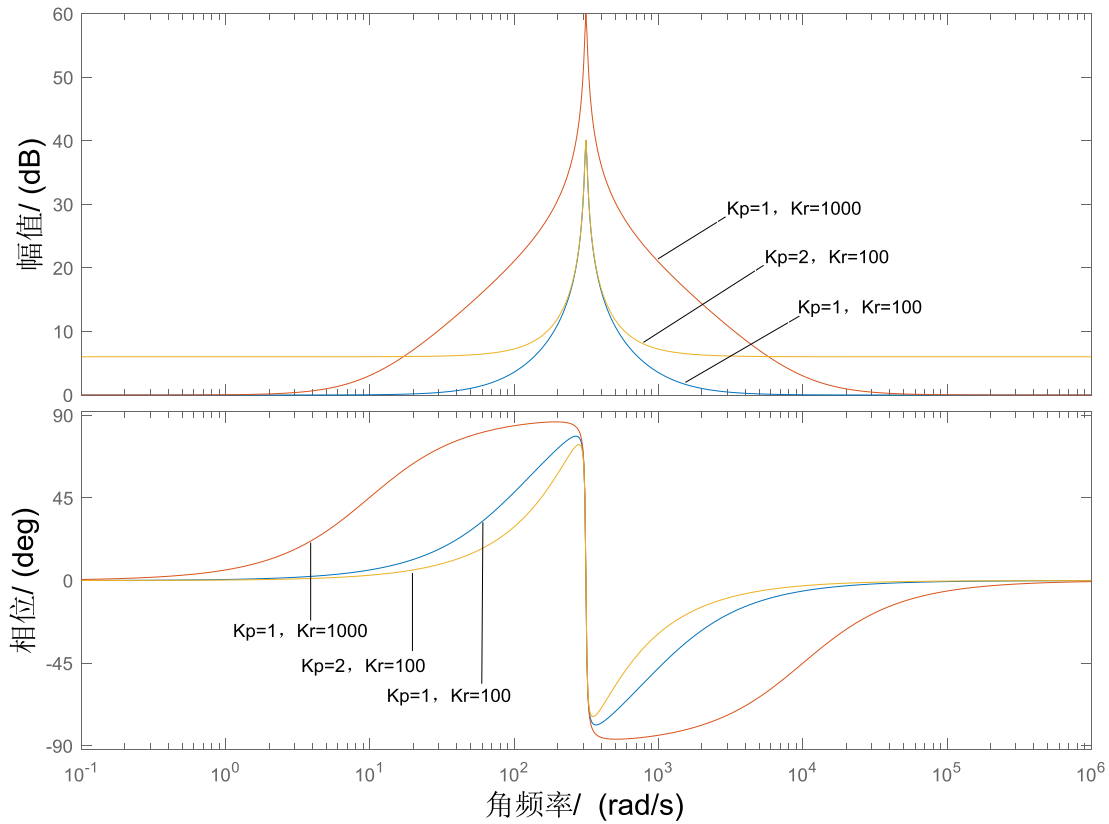
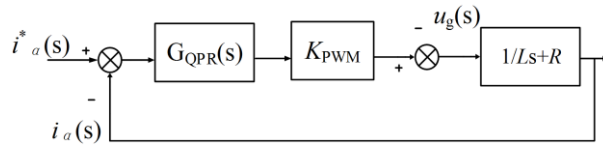
图 6 K_p/K_r 取不同参数时准谐振控制器传递函数波特图

图 7 QPR 控制结构图

由图 7 可得式(12):

$$i_a(s) = \frac{K_{PWM} G_{QPR}(s)(Ls+R)}{1 + K_{PWM} G_{QPR}(s)(Ls+R)} I_a^*(s) - \frac{K_{PWM} G_{QPR}(s)(Ls+R)}{1 + K_{PWM} G_{QPR}(s)(Ls+R)} \left(\frac{1}{K_{PWM} G_{QPR}(s)} - H(s) \right) u_g(s) \quad (12)$$

当满足式(13)时, 电网电压扰动被消除。

$$H(s) = \frac{1}{K_{PWM} G_{QPR}(s)} \quad (13)$$

3.3 改进 QPR 控制器的设计

本文所提基于准谐振控制器的控制策略适用于低电压穿越问题, 可有效限制并网点电流不过限以及维持直流母线电压稳定。但经 FFT 分析, 并网点电流谐波含量仍然较高, 见图 8。

针对应用该控制器出现的 THD 偏大的问题, 在原

有基础上进行改进, 增加谐波补偿环节。经改进后, 控制器传递函数如式(14)所示。

$$G(s) = K_p + \underbrace{\frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}}_1 + \sum_{n=3,5,7} \underbrace{\frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (n\omega_0)^2}}_2 \quad (14)$$

式(14)中, 第一段为准谐振控制器, 第二段为高次谐波补偿器, 高次谐波补偿器 K_r , K_p , ω_c 的选取与前文所提准谐振控制器类似。该补偿器只补偿 3、5、7 次谐波, 改进后的准谐振控制器波特图如图 9 所示。可以看出, 经改进后的控制器不仅在基波处增益很高,

对 3、5、7 次谐波处的增益同样很高。因此，该策略 高次谐波的能力，提高并网电流电能质量。
不仅保证了对基波实现无稳态误差控制，还具有抑制

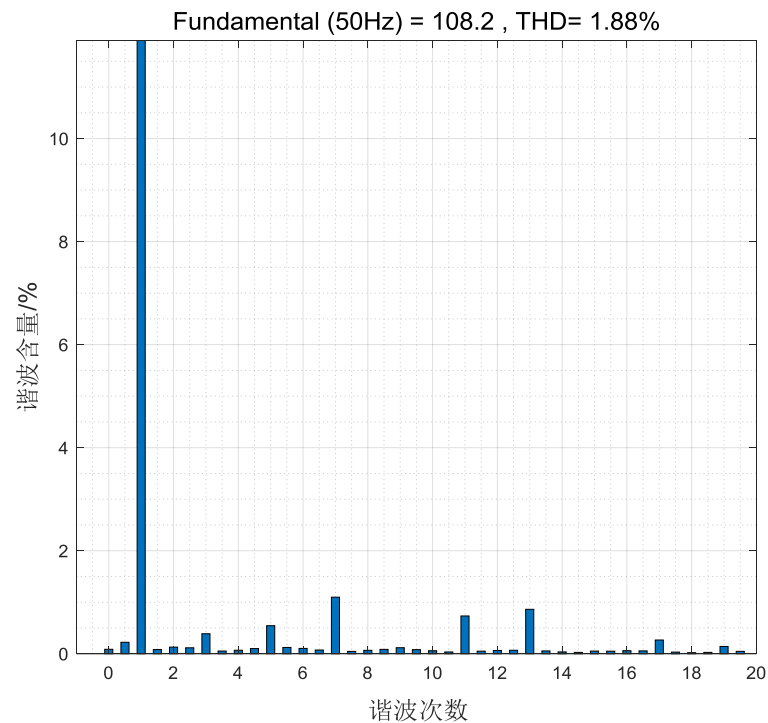


图 8 改进 QPR 控制策略的仿真结果

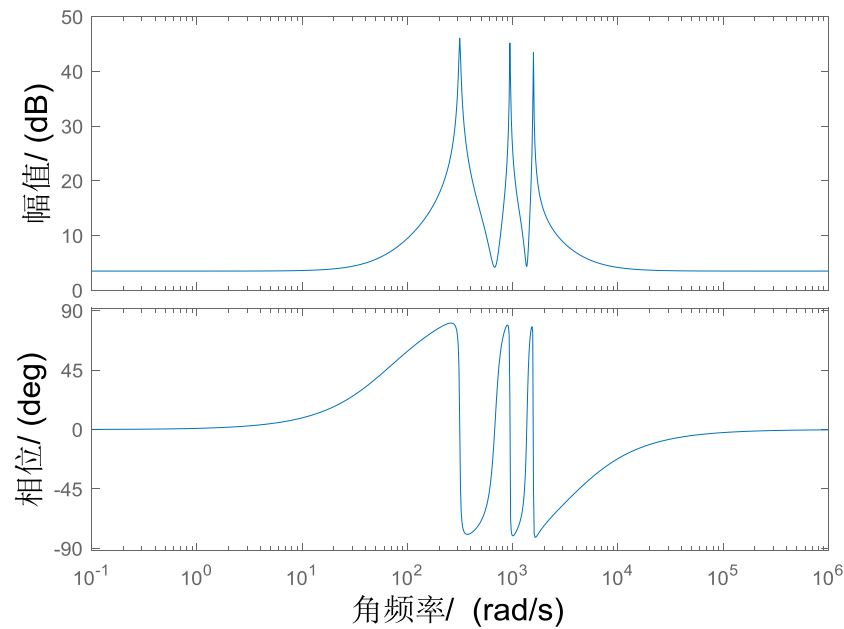


图 9 改进 QPR 控制器的波特图

4 仿真实验

为了验证上述所提控制策略的可行性，基于

Matlab/Simulink 搭建了微电网并网发电系统仿真模型，并在电网电压发生不对称暂降工况对该系统网侧电压进行仿真测试。仿真参数如表 1 所示。微电网结构图如图 10 所示。

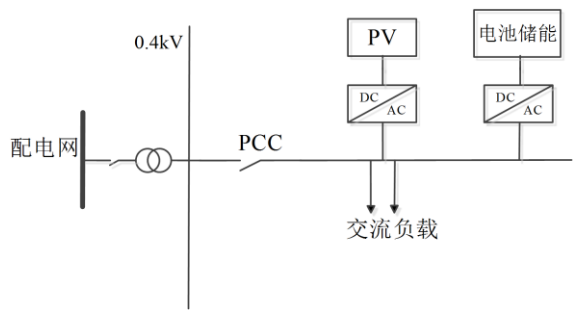


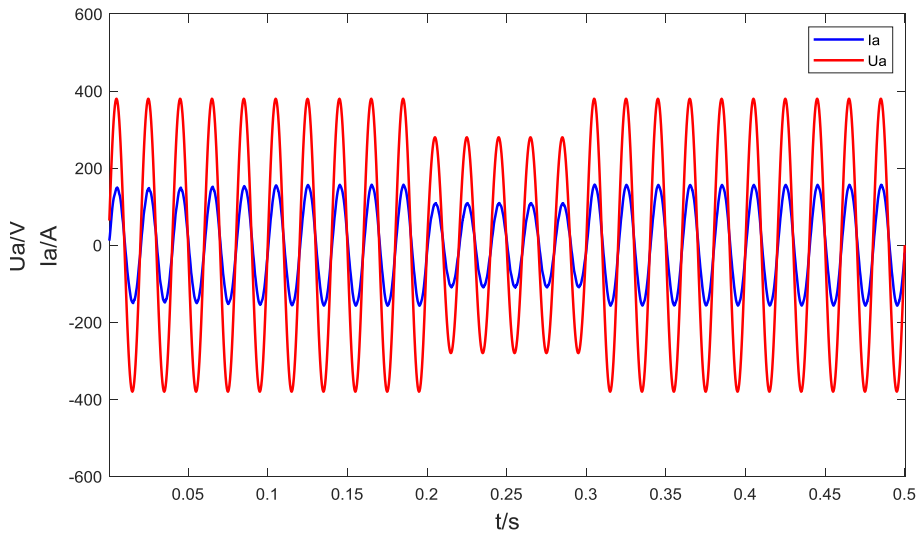
图 10 微电网结构图

表 1 系统仿真参数

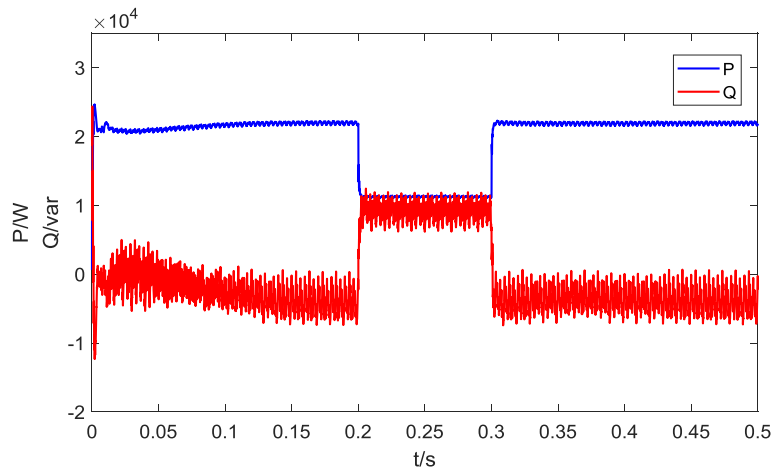
电网参数	数值
直流电源 U_{dc}/V	500
逆变器侧电感 L_1/mH	1.02
网侧电感 L_2/mH	0.21
电网感性阻抗 R/Ω	1
滤波电容 $C/\mu F$	21.6

设定此时 PCC 点 A 相电压为 380V，其 PCC 点的 a 相电压、电流如图 11(a)所示，有功功率、无功功率如图 11(b)所示，直流母线电压如图 11(c)所示，储能系统吸收功率如图 11(d)所示，改进控制策略后的并网电流谐波分析如图 11(e)所示。

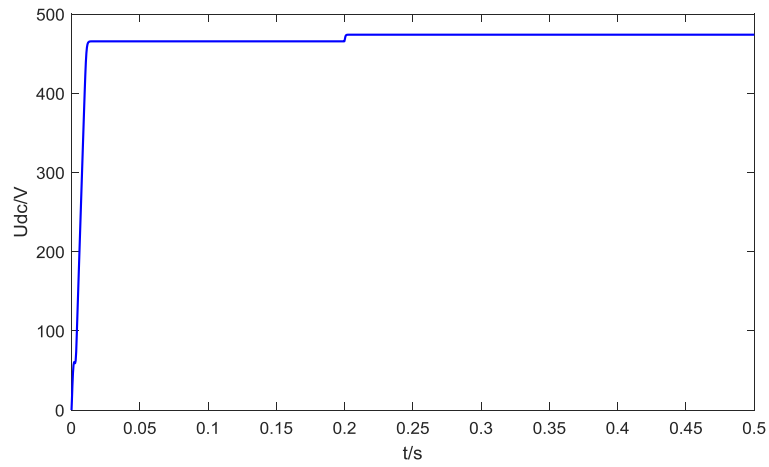
0.2s 时 B 相和 C 相电压由 380V 跌落至 280V，持续 100ms 后电压恢复。在不附加额外控制策略时，逆变器不发出无功功率，电压跌落期间并网点电流增大，微电网脱网运行。加入本文所提控制策略后，由图 11(a)可见并网电压跌落时，并网点电流减小。由图 11(c)和图 11(d)可看出，电压跌落期间，储能设备吸收功率不为 0，均为直流母线由于电压跌落产生的多余功率，因此直流侧电压基本维持稳定，说明光伏发电系统可对功率进行快速调节。



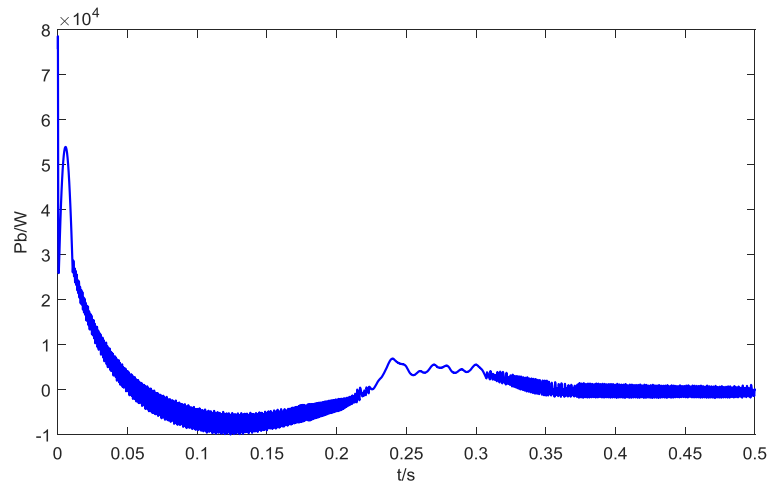
(a) 并网点电压、电流



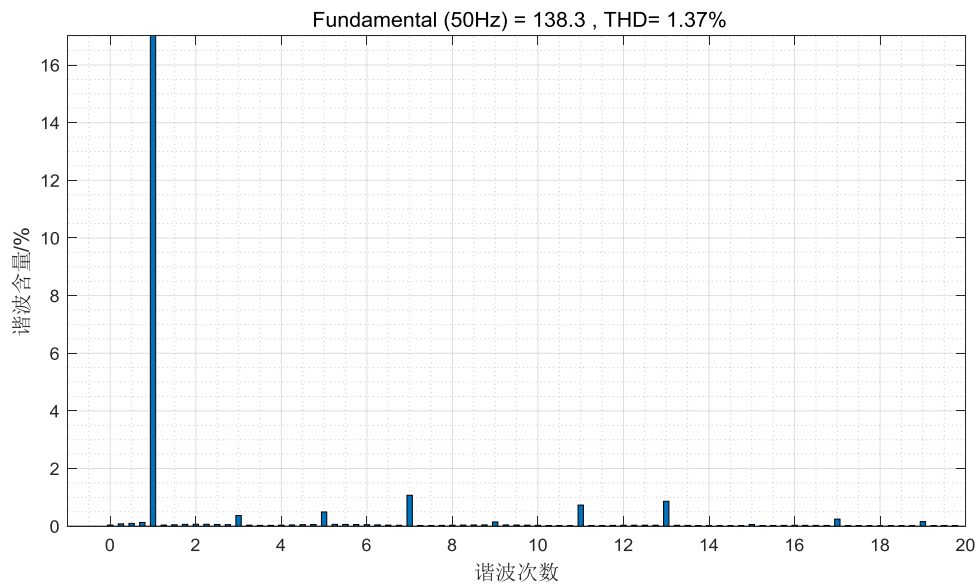
(b) 并网点有功功率、无功功率



(c) 直流母线电压



(d) 储能系统输出功率



(e) 并网电流谐波分析

图 11 改进 QPR 控制策略的仿真结果

由图 11(b)可看出, 在电压跌落期间, 有功功率由 20kW 降至 15kW, 因此限制了并网点电流不突变, 同时光伏系统可向电网侧输出更多无功裕量以助电压恢复, 大大提高了微电网的低电压穿越能力。由图 11(e)可见高次谐波在附加补偿器后被抑制, 并网点电流谐波分量降至 1.37%, 电流质量提高。

5 结论

本文针对光储微电网, 首先介绍了 LCL 型滤波器的工作原理, 然后通过对控制器的设计阐述了一种基于准谐振控制器 (QPR) 的 LVRT 控制策略, 仿真验证的结果表明:

- (1) 故障期间, 并网电流没有突变, 并可以提供无功功率以恢复电网电压, 系统恢复过程平稳迅速, 成功实现低电压穿越。
- (2) 在电网电压发生不对称故障时, 通过光伏系统储能控制以及准谐振控制器的共同作用可以维持直流母线电压稳定。
- (3) 结合准谐振控制器可无静差控制交流量的特点所设计的谐波补偿器有效降低了高次谐波的影响, 电流质量得到改善。

本文所提控制策略依然有一定局限性, 虽然通过避免提取电流电压的正负序分量提高了系统的动态性能, 但准谐振控制器对硬件系统的精准度要求较高, 且电网频率偏移问题在一定程度上依旧存在。

参考文献

- [1] 边志维, 何远彬, 吴圆圆, 等. 一种提高 LCL 型并网逆变器无源性及抗扰性的网侧电流控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (6): 2175-2186.
- [2] 李培强, 曾小军, 李欣然, 等. 基于神经网络的分布式电源统一等效建模及其在 PSASP 中的应用 [J]. 电网技术, 2016, 40 (4): 1224-1230.
- [3] 杜永安, 杜丽艳, 徐岩. 光伏发电接入柔直互联区域调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (6): 1-9.
- [4] 丁明, 胡迪, 毕锐, 等. 含高渗透率可再生能源的配电网可靠性分析 [J]. 太阳能学报, 2020, 41 (2): 194-202.
- [5] Mirhosseini M, Pou J, Agelidis V G. Single-and two-stage inverter-based grid-connected photovoltaic power plants with ride-through capability under grid faults [J]. IEEE Transactions on sustainable energy, 2014, 6 (3): 1150-1159.
- [6] Jiandong D, Xinxin W, Jing W, et al. Optimal allocation of reactive power compensation in distribution network with high permeability and distributed photovoltaic [C]//2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2018: 1166-1171.
- [7] 杨堤, 程浩忠, 马紫峰, 等. 基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力的分析和展望 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (12): 1-10.
- [8] Qiu T, Wang X, Yin Q, et al. Research on precise voltage regulation control strategy of high and low voltage ride through test device of inverter[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). IEEE, 2021: 944-948.
- [9] 涂春鸣, 郭祺, 姜飞, 等. 适用微网故障穿越的多功能并网变换器研究 [J]. 电网技术, 2017, 41 (6): 1980-1988.
- [10] 黄显斌, 林达, 王慧芳. 并网光伏系统低电压穿越策略综述 [J]. 机电工程, 2016, 33 (5): 589-594.
- [11] 房志学, 苏建徽, 王华锋, 等. 微网逆变器低电压穿越控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (2): 143-149.
- [12] 孙丽玲, 王艳娟. 基于 Crowbar 串联电容的双馈风机低电压穿越综合控制策略 [J]. 电网技术, 2018, 42 (7): 2089-2095.
- [13] 王贵忠, 吴凤江, 李洪波, 等. 基于电流预测控制的二极管箝位拓扑可变速并网逆变器 [J]. 高电压技术, 2020, 46 (1): 144-150.
- [14] Shi K, Song W, Xu P, et al. Low-voltage ride-through control strategy for a virtual synchronous generator based on smooth switching [J]. IEEE Access, 2017, 6: 2703-2711.
- [15] 汤旻安, 高晓红. 不平衡电网电压条件下光储微电网并网控制 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (06): 1879-1888.
- [16] 李华. 三相光伏系统并网控制及低电压穿越的研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [17] Plet C A, Green T C. A method of voltage limiting and distortion avoidance for islanded inverter-fed networks under fault [C] // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2011: 1-8.
- [18] Sadeghkhani I, Golshan M E H, Guerrero J M, et al. A current limiting strategy to improve fault ride-through of inverter interfaced autonomous microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8 (5): 2138-2148.