低压微网逆变器自适应谐波下垂控制策略

黄骏翅,曾　江,杨　林,黄仲龙
(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要:在多个分布式电源逆变器并联于同一公共连接点(PCC)的典型低压微网中,针对各并联逆变器在无通信线情况下难以协调抑制PCC处谐波电压的问题,提出了低压微网逆变器自适应谐波下垂控制策略。将基波鲁棒性下垂控制的思想引入谐波控制,建立和分析了鲁棒性谐波下垂控制的控制框图,并根据鲁棒性下垂控制应用至谐波控制额定工况的特殊性,对其进行简化设计;在此基础上,设计了基于PCC处谐波电压检测的下垂系数自适应调节策略和多准比例谐振(PR)电流跟踪方案。通过PSCAD仿真软件构造了2台逆变器并联运行工况对所提策略进行验证,仿真结果表明,自适应谐波下垂控制策略能将PCC处的谐波电压抑制在设定范围内,并且能按逆变器容量分配谐波功率。搭建了2台逆变器并网运行的实验平台,进一步验证了所提策略的有效性,结果表明所提控制策略能使多台并联逆变器在无通信线和负载电流传感器的情况下,独立、自治地参与微网电能质量治理,并按各自容量抑制PCC处的谐波电压。

关键词:低压微网;逆变器;谐波抑制;下垂控制;谐波功率
中图分类号:TM 464　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.029

0　引言

近年来,我国对可再生能源的开发和利用尤为重视,全面提高对可再生能源发电的支持,逐步实现能源结构的战略调整,而微网是可再生能源分布式发电规模化应用的有力解决途径[1-3]。但是,随着电力电子装置在微网中的应用和非线性负载的大量接入,导致微网公共连接点PCC(Point of Common Coupling)处的电压发生畸变,对接入的电力设备造成恶劣的影响。针对该问题,一般采用有源电力滤波器APF(Active Power Filter)来治理谐波,但专门的电能质量治理装置的安装成本高、功能单一,并且容量利用率低、经济性较差、推广难度大。考虑到微网中分布式电源逆变器与APF在拓扑和控制上是相似的,一般具有较大的容量裕度,且其离微网PCC处的用电设备和谐波源较近,易于就地治理,因此有学者提出利用分布式电源逆变器对微网PCC进行谐波治理,并已有了大量的研究成果[4-13]。

文献[4-8]提出了一种光伏并网和有源滤波统一控制策略,在实现最大功率点跟踪MPPT(Maximum Power Point Tracking)的前提下,检测负载电流的无功分量和谐波分量,利用逆变器的剩余容量对其进行补偿。这种策略能最大化补偿谐波源产生的谐波电流和无功功率,但需额外的电流互感器对固定谐波源进行采集,在谐波源较多或其分布较散的情况下,都需增大传感器和线路的成本;文献[9-11]提出一种分频虚拟电阻的多逆变器并联控制策略,通过减小逆变器在各次谐波频率下的等效输出电阻,有效地分担各次谐波功率,从而改善各并联逆变器输出电压的质量,但该策略的主要控制目标是各并联逆变器间的谐波环流,无法进一步补偿PCC处的谐波源电流,因此不能充分利用其容量进行谐波治理;文献[12-13]提出一种并联谐波阻尼型逆变器控制策略,该策略通过控制逆变器的输出谐波电流和谐波电压成固定比例,使逆变器在外特性上表现为纯阻性,利用虚拟谐波阻尼的分压作用有效地抑制PCC处的谐波电压,但由于逆变器输电线路阻抗的差异,难以实现各并联逆变器按容量治理谐波。

针对以上控制策略存在的不足,本文参考基波鲁棒性下垂控制[14-15]在调压调频的同时能按容量精确分配各并联逆变器功率的基本原理,提出了一种低压微网逆变器自适应谐波下垂控制策略,在无互联通信线以及负载电流传感器的情况下,实现PCC处电压谐波抑制以及各逆变器间谐波的功率分配,并在鲁棒性谐波下垂控制的基础上,设计了基于PCC处电压谐波检测的下垂系数自适应调节器,以适应不同大小的系统侧谐波源和非线性负载。

首先,将基波鲁棒性下垂控制的思想引入谐波控制上,建立和分析了鲁棒性谐波下垂控制的控制框图,并根据鲁棒性下垂控制应用至谐波控制额定工况的特殊性,对其进行简化设计,并在此基础上设计了下垂系数自适应调节策略;然后,设计了基于自适应谐波下垂控制的整体控制结构及其电流跟踪方案;最后,通过PSCAD仿真以及硬件实验对本文所提策略进行验证。

收稿日期:2017-12-14;**修回日期**:2018-03-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477055,51777078)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477055,51777078)

1　鲁棒性谐波下垂控制建模与优化

1.1　鲁棒性谐波下垂控制建模

多逆变器并联的典型微网等效电路见附录 A 中图 A1，逆变器、线性负载和非线性负载共同并联在交流母线 PCC 上，并网运行时 PCC 与系统相连，本文主要针对并网场景进行设计与分析。

对于低压微网而言，线路阻抗中的电阻值 $R_{\text{line}k}$（$k=1,2,\cdots,m$）远大于电抗值，而逆变器的 LCL 滤波器在低频段呈现电感特性，使逆变器至 PCC 的总阻抗（Z_{ok}）呈现阻感性，从而导致输出有功功率和无功功率均与逆变器空载电势的幅值和相角有关。为了解除上述的耦合关系，在逆变器的控制算法中引入虚拟的电阻[15]，如图 1 所示。图中，E_{hd}^{*} 为 h 次空载谐波电势的 d 轴分量；E_{hq}^{*} 为 h 次空载谐波电势的 q 轴分量；$P_{h\text{set}}$、$Q_{h\text{set}}$、$U_{h\text{set}}$ 分别为设定的谐波有功、无功和电压，其值等于额定工况下的相应值；n_h、m_h 分别为谐波有功和无功的下垂系数，其与逆变器的容量成反比；ω_1 为基波角频率；$U_{h\text{L}}$ 为 PCC 处 h 次谐波电压；$\boldsymbol{e}_{h\text{abc}}^{*}$ 为 h 次三相空载谐波电势瞬时值；$\boldsymbol{u}_{h\text{abc}}^{*}$ 为 h 次三相输出谐波电压瞬时值；$\boldsymbol{i}_{h\text{abc}}^{*}$ 为 h 次三相输出谐波电流瞬时值。此外，虚拟电阻的阻值远大于输电线路的阻值，即 $Z_{ok}=R_{\text{vir}_k}\gg R_{\text{line}k}$，因此网络阻抗取决于虚拟电阻而不再依赖于输电线路阻值，通过配置逆变器间虚拟电阻阻值的相对大小，可以有效地抑制多逆变器间的有功和无功环流。不同容量逆变器的功率特性形式一致，下文分析谐波功率时忽略逆变器变量的角标。忽略线路阻抗，逆变器输出的谐波有功功率和谐波无功功率的表达式分别如式（1）、式（2）所示。

$$P_h=\frac{E_h^{*}U_{h\text{L}}\cos\varphi_h-U_{h\text{L}}^{2}}{R_{\text{vir}_h}} \tag{1}$$

$$Q_h=-\frac{E_h^{*}U_{h\text{L}}\sin\varphi_h}{R_{\text{vir}_h}} \tag{2}$$

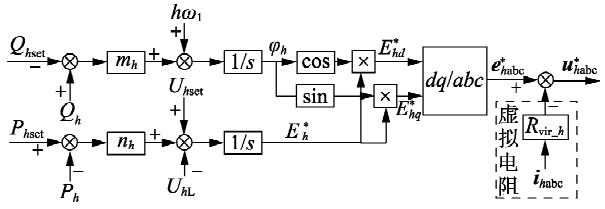


图 1　鲁棒性谐波下垂控制结构框图

Fig.1　Structure diagram of Robust harmonic droop control

一般 φ_h 很小[15]，故式（1）、式（2）可分别简化为式（3）、式（4）。

$$P_h=U_{h\text{L}}\frac{E_h^{*}-U_{h\text{L}}}{R_{\text{vir}_h}} \tag{3}$$

$$Q_h=-\frac{E_h^{*}U_{h\text{L}}\varphi_h}{R_{\text{vir}_h}} \tag{4}$$

由式（3）、（4）可知，可通过控制 E_h^{*} 从而控制 P_h、通过控制 φ_h 从而控制 Q_h，参照基波的传统下垂控制[16]，可得谐波下垂控制方程如式（5）、（6）所示。

$$E_h^{*}=n_h(P_{h\text{set}}-P_h)+U_{h\text{set}} \tag{5}$$

$$\omega_h=m_h(Q_h-Q_{h\text{set}})+h\omega_1 \tag{6}$$

其中，ω_h 为无功下垂控制器的输出值，经积分后得到 φ_h。由于 R_{vir_k} 太大会引起系统不稳定[17-18]，故难以实现逆变器串联总阻抗按容量匹配。为了增大功率按容量分配的鲁棒性，在有功功率控制的前馈通道上增加积分环节，并引入 PCC 处谐波电压幅值负反馈抑制谐波电压[15]。整体的鲁棒性谐波下垂控制如图 1 所示。根据式（3）、（4），图 1 所示控制策略的等效框图如图 2 所示。

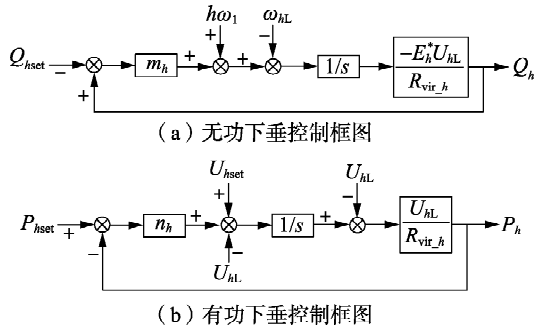


图 2　鲁棒性谐波下垂控制等效框图

Fig.2　Equivalent structure diagram of Robust harmonic droop control

当系统到达稳态时，积分器的输入信号等于 0，同时 PCC 处的 h 次谐波频率等于逆变器的 h 次谐波频率，即有 $\omega_{h\text{L}}=h\omega_1$，结合图 2 有：

$$n_h(P_{h\text{set}}-P_h)=U_{h\text{L}}-U_{h\text{set}} \tag{7}$$

$$Q_h=0 \tag{8}$$

PCC 处电压幅值 $U_{h\text{L}}$、谐波电压设定值 $U_{h\text{set}}$ 对于每个逆变器都相同，而各逆变器间下垂系数与其容量成反比，由式（7）可知，各逆变器的谐波功率 P_h 严格按照逆变器容量分配，而与线路阻值无关，由此在理论上证明了鲁棒性谐波下垂控制的有效性。至此，参照基波的鲁棒性下垂控制建立了鲁棒性谐波下垂控制的基本控制结构。

1.2　鲁棒性谐波下垂控制简化设计

从图 1 所示的控制框图可知，该控制策略难以实现，一方面，谐波功率的精确计算以及 PCC 处谐波电压的提取，都需加低通滤波器滤除其他次数谐波和基波分量，或者需采用傅里叶变换提取频谱，从而造成了闭环反馈通道的延时，严重影响系统的稳定性；另一方面，虚拟阻抗的特性由逆变器输出电流

至输出电压的传递函数决定，该传递函数在高频段必存在相位滞后，导致谐波虚拟阻抗呈阻感性，无法实现谐波有功和无功的解耦控制。因此，鲁棒性谐波下垂控制要应用在实际必须做进一步的改进。现做以下简化，在无非线性负载和系统侧无谐波电势的情况下，谐波有功、无功、PCC 处谐波电压均为 0，以此为额定工况，可设 $P_{h\text{set}}$、$Q_{h\text{set}}$、$U_{h\text{set}}$ 为 0，则式(7)可简化为式(9)。

$$P_h=-U_{h\text{L}}/n_h \tag{9}$$

由式(9)可得逆变器入网 h 次谐波电流 $\boldsymbol{I}_h$ 的表达式如式(10)所示。

$$\boldsymbol{I}_h=(P_h-\text{j}Q_h)/U_{h\text{L}}=-1/n_h \tag{10}$$

由式(10)可见，鲁棒性谐波下垂控制的控制效果与恒逆变器输出电流等效，且输出 h 次谐波电流幅值 I_h 为有功下垂系数的倒数，相位与 PCC 点 h 次谐波电压相位相反。

1.3 下垂系数自适应调节控制策略设计

有功下垂系数取决于负载有功的变化范围和 PCC 处电压幅值允许的范围，但负载谐波有功的变化范围难以预测，故提出下垂系数自适应调节控制策略，其控制流程图如图 3 所示。图中，k_i 为与逆变器容量成正比的固定系数，而每台逆变器的自适应下垂增量值 ΔI_set、h 次谐波电压上阈值 $U_{h\text{setH}}$、h 次谐波电压下阈值 $U_{h\text{setL}}$ 都设为相同的定值。当逆变器并联的母线与电网间的总开关合上后，逆变器同时检测到电网电压进行初始化，或所有逆变器每天定时进行初始化，即令 h 次谐波电流为 0。当各逆变器检测到 PCC 处谐波电压的幅值大于 $U_{h\text{setH}}$ 或小于 $U_{h\text{setL}}$ 时，经一段时间的延时以确保每个逆变器都检测到上述越界信号，再根据图 3 所示算法对输出电流 I_h 进行修正，所有逆变器按容量比例同时增加或减小输出电流 I_h，由式(9)和(10)可知，各逆变器谐波功率按其容量分配。下文将解释该策略调节谐波电压的机理。

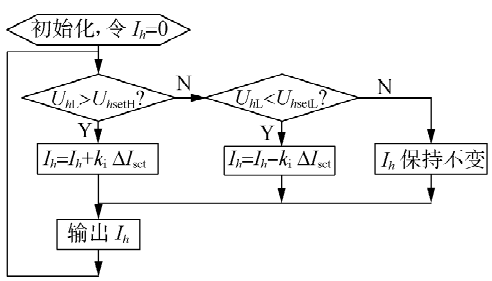


图 3 下垂系数自适应调节流程图

Fig.3 Flowchart of adjusting droop coefficient adaptively

附录 A 的图 A1 中 PCC 的右边部分，即包含系统谐波电势、系统阻抗、负载阻抗和谐波电流源的部分，可用戴维南等效电路表示，即可以用一个谐波空载电势 $E_{h\text{eq}}$ 和谐波电阻 $R_{h\text{eq}}$ 串联在 PCC 处表示，易得 PCC 处谐波有功与端电压的网络特性，如式(11)所示。

$$P_h=\frac{U_{h\text{L}}(U_{h\text{L}}-E_{h\text{eq}})}{R_{h\text{eq}}} \tag{11}$$

由式(11)可以看出，P_h 与 $U_{h\text{L}}$ 的关系是关于 $U_{h\text{L}}=E_{h\text{eq}}/2$ 对称、开口朝上的抛物线，如图 4 中曲线 $P_{gh1}(U_{h\text{L}})$、$P_{gh2}(U_{h\text{L}})$ 和 $P_{gh3}(U_{h\text{L}})$ 所示。由式(9)可得逆变器下垂特性曲线。图 4 中，曲线 $P_{ih1}(U_{h\text{L}})$ 和 $P_{ih2}(U_{h\text{L}})$ 为所有逆变器的总下垂特性，即为各逆变器下垂特性曲线在纵轴上的叠加，该曲线的斜率即为所有逆变器输出的 h 次谐波电流幅值的之和 $I_{h\text{sum}}$ 的相反数。另外，从式(9)可以看出，该策略需占用逆变器的剩余容量，为了准确调节特定次数的谐波电压，单个逆变器只能同时治理有限次数的谐波，如同时治理典型次数 5、7 次的谐波。若想治理更多次数的谐波，可对 PCC 处的逆变器进行分组处理，每组负责治理特定的谐波。

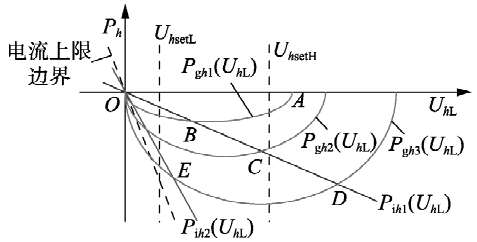


图 4 下垂系数自适应调节

Fig.4 Adaptive adjustment of droop coefficient

现以图 4 所示的调节过程为例解释谐波电压的调节机理。

a. 当 $E_{h\text{eq}}$ 较小时，网络特性曲线为 $P_{gh1}(U_{h\text{L}})$，当 $I_{h\text{sum}}=0$ 时，系统运行在点 A，此时，谐波电压的幅值 $U_{h\text{L}}>U_{h\text{setH}}$，下垂系数自适应调节器调整下垂系数，即增大 $I_{h\text{sum}}$，此时逆变器总下垂特性为 $P_{ih1}(U_{h\text{L}})$，与 $P_{gh1}(U_{h\text{L}})$ 交于点 B，可见，点 B 的 h 次谐波电压幅值在设定的范围内。

b. 当 $E_{h\text{eq}}$ 增大、网络特性曲线为 $P_{gh2}(U_{h\text{L}})$ 时，系统运行在点 C，此时，h 次谐波电压幅值依然在设定的范围内，可见，$E_{h\text{eq}}$ 在一定范围内变化时，固定的 $I_{h\text{sum}}$ 能使谐波电压控制在设定范围内。另外，类比同步发电机的一次调频下垂特性可知，在 $I_{h\text{sum}}$ 固定的范围内可同时抑制谐波电压以及谐波有功功率的波动。

c. 当 $E_{h\text{eq}}$ 继续增大、网络特性曲线为 $P_{gh3}(U_{h\text{L}})$ 时，系统运行在点 D，下垂系数自适应调节控制器在检测到谐波电压过大后，增大 $I_{h\text{sum}}$ 值，逆变器总下垂特性为 $P_{ih2}(U_{h\text{L}})$，此时系统运行在点 E，谐波电压控制在设定范围内。同理，当 $E_{h\text{eq}}$ 变小后，网络特性变为 $P_{gh2}(U_{h\text{L}})$，逆变器总下垂曲线调节为 $P_{ih1}(U_{h\text{L}})$，系统从点 E 回到点 C。

d. 另外有 2 种特殊情况，第一种情况是 E_{heq} 增大后逆变器检测到 $U_{hL}>U_{hsetH}$ 而增大 I_{hsum} 值，但 E_{heq} 回到原值后 U_{hL} 却未低于 U_{hsetL}，这种情况会使逆变器在同一上下阈值电压下输出较高的 I_{hsum} 值，同理 E_{heq} 先下降后回升，有可能使得逆变器运行在较低的 I_{hsum} 值；第二种情况是 E_{heq} 的增大使逆变器增大 I_{hsum} 值后又使 $U_{hL}<U_{hsetL}$，这种情况会使 I_{hsum} 值上下振荡，针对这种情况，可在软件上识别 I_{hsum} 值的振荡从而使 I_{hsum} 值运行在其中较大值，而使 U_{hL} 的值低于下阈值，另外增大上、下阈值之差可减小这种情况的发生。由上述分析可知，本文提出的自适应谐波下垂控制可随着 E_{heq} 的变化自适应调整下垂系数，从而使谐波电压稳定在上阈值 U_{hsetH} 内。

2　基于谐波下垂控制的电流跟踪方案

下文以控制 5、7 次谐波为例分析和设计自适应谐波下垂控制控制方案。当逆变器的输出滤波器采用 LCL 滤波电路时，本文所提的自适应谐波下垂控制策略的整体控制结构框图如图 5 所示。图中，u_L 为 PCC 处电压瞬时值；U_{5L} 和 θ_5 分别为 PCC 处 5 次谐波电压的幅值和相位；U_{7L} 和 θ_7 分别为 PCC 处 7 次谐波电压的幅值和相位；I_5^* 为 5 次参考谐波电流有效值；I_7^* 为 7 次参考谐波电流有效值；i_1^* 为逆变器直流侧电压外环输出的基波电流参考值；i_5^* 为 5 次参考谐波电流瞬时值；i_7^* 为 7 次参考谐波电流瞬时值；i^* 为总参考谐波电流瞬时值；u_o 为逆变器输出电压瞬时值；i_2 为逆变器输出电流瞬时值；k_{PWM} 为逆变器等效比例数；L_1 为逆变桥侧电感；L_2 为入网侧电感；C_c 为滤波电容；k_c 为电容电流反馈系数。图 5 由下垂控制器、电流跟踪控制器以及基于 LCL 滤波器的逆变器数学模型组成。由第 1 节分析可知，自适应谐波下垂控制器需检测 PCC 处谐波的幅值和相角，本文采用具有较高实时性的离散傅里叶变换 DFT（Discrete Fourier Transform）进行检测，分别提取 5、7 次谐波的幅值和相角，幅值进入下垂系数自适应调节器，得到逆变器谐波参考电流的幅值，结合电压谐波相角合成 5、7 次参考谐波电流的瞬时值，再与由逆变器直流电容电压外环给出的基波电流参考值叠加，从而得到逆变器总的输出电流参考值。电流跟踪控制采用多准比例谐振（PR）控制方案，其传递函数如式（12）所示。

$$G_{PR}(s)=k_p+\sum_{h=1,5,7}\frac{k_{rh}\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+(h\omega_1)^2} \tag{12}$$

其中，k_p 为比例系数；ω_c 为截止频率；k_{rh} 为谐振比例系数。该控制器在设定谐波频率处有较高的增益，且截止频率 ω_c 的引入可以有效地减小电网频率偏移对逆变器输出电流的影响。另外，在多准 PR 控制器后引入电网电压前馈以抑制电压扰动，引入电容电流负反馈以增加系统的阻尼[19]。PCC 处谐波电压的变化周期较长，而准 PR 控制器具有较高的动态性能，DFT 又具有较高的检测速度，故本文方案能精确调节 PCC 处谐波电压。

根据图 5 所示结构框图，可求得参考电流 i^* 至逆变器输出电流 i_2 的开环传递函数与闭环传递函数，分别如式（13）、式（14）所示。

$$G(s)=\frac{k_{PWM}G_{PR}(s)}{s^3L_1L_2C+s^2L_2C_ck_ck_{PWM}+s(L_1+L_2)} \tag{13}$$

$$\Phi(s)=\frac{G(s)}{1+G(s)} \tag{14}$$

取 $L_1=0.74$ mH、$L_2=55$ μH、$C_c=6.6$ μF、$K_{PWM}=1$，综合考虑系统的稳定性和抗扰性[20]，选取多准 PR 控制器的参数为 $k_p=4$、$k_{r1}=200$、$k_{r5}=200$、$k_{r7}=200$，$\omega_c=5$ rad/s，电容电流反馈系数 $k_c=15$。将以上参数代入式（13）、（14）可得到相应的波特图，见附录 B 中图 B1。从图 B1（a）的开环波特图可见，系统的幅值裕度为 12.1 dB，相位裕度为 78.8°，均满足稳定性要求；从图 B1（b）的闭环波特图可见，该闭环系统频率响应在基波、5 次和 7 次谐波相对应的频率下均呈现幅值接近 0、相位接近 0°，可见本文所提电流跟踪算法对设定次谐波具有较高的跟踪精度。

3　仿真与实验

为了验证所提控制策略的有效性，采用 PSCAD 仿真软件构造 2 条逆变电源支路、2 条由不可控整流桥接电阻负载的非线性负载支路，以及用三相基波电压源、三相 5、7 次谐波电压源和阻抗串联等效的微网系统侧电路，其连接方式与附录 A 中图 A1

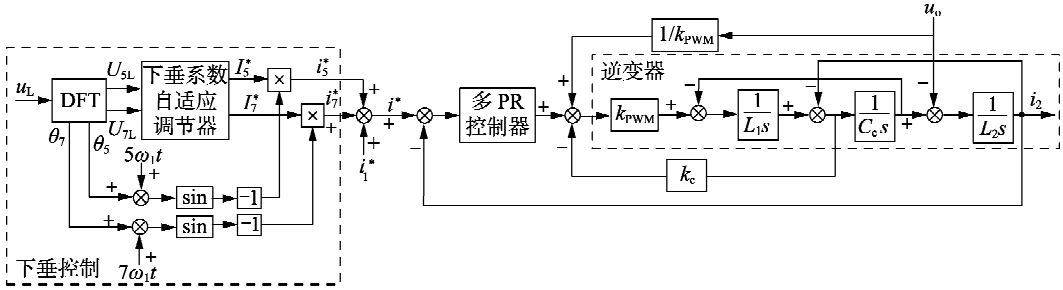


图 5　自适应谐波下垂控制系统结构框图

Fig.5　Structure diagram of adaptive harmonic droop control system

一致。其中逆变器1的容量为10 kW,逆变器2容量为15 kW,两者均为NPC三电平电压源型逆变器。由于逆变器直流电容电压控制不作为本文的研究对象,仿真中用2个幅值为325 V的理想直流电压源并联在逆变器直流侧,基波电流指令设定为恒定值,逆变器1的基波指令电流有效值为7.5 A,逆变器2的基波指令电流有效值为11.3 A,k_{PWM}经标幺化处理后为1。非线性负载支路1所接电阻为80 Ω,非线性负载支路2所接电阻为20 Ω,分别代表大非线性负载和小非线性负载。系统基波电势为220 V,5次谐波电势为4.5 V,7次谐波电势为3 V,系统侧等效阻抗 $Z_s=0.1+j0.01$ Ω。多准PR控制器参数和电容电流反馈系数与第2节相同。自适应下垂控制的工作步长为0.06 s。其余仿真参数如下:逆变桥侧电感 $L_1=0.74$ mH,入网侧电感 $L_2=55$ μH,滤波电容 $C_c=6.6$ μF,载波频率 $f_c=20$ kHz,逆变器线路阻抗 $Z_{line}=0.15+j0.015$ Ω,自适应下垂增量值 $\Delta I_{set}=2$ A,逆变器1下垂增量系数 $k_1=1$,逆变器2下垂增量系数 $k_2=1.5$,5次谐波上阈值电压 $U_{5setH}=4$ V,5次谐波的下阈值电压 $U_{5setL}=3$ V,7次谐波的上阈值电压 $U_{7setH}=3$ V,7次谐波下阈值电压 $U_{7setL}=2$ V。

仿真时间为1 s,仿真过程如下:2台逆变器在0.2 s启动自适应谐波下垂控制,0.4 s时合上非线性负载支路1,0.6 s时合上非线性负载支路2,0.8 s同时断开以上2个负载,其仿真波形如图6所示。在0.2 s之前,自适应谐波下垂控制尚未启动,2台逆变器的输出谐波电流、谐波功率均为0,此时5次谐波电压为4.5 V,7次谐波电压为3 V。0.2 s时刻,启动自适应下垂控制,2台逆变器分别调节各自的输出谐波电流,其中逆变器1的5次谐波电流为4 A、7次谐波电流为2 A,逆变器2的5次谐波电流为6 A、7次谐波电流为3 A;PCC处5次谐波电压下降至3.5 V,7次谐波电压降至2.5 V。0.4 s时刻,小非线性负载支路1合上,使5、7次谐波电压均有所增大,但均未超过阈值,因此,2台逆变器的谐波电流均未改变,此过程相当于下垂系数固定的常规鲁棒性下垂控制,起到抑制谐波电压和谐波功率波动的作用。0.6 s时刻合上大非线性负载支路2,5次谐波电压超过上阈值,2台逆变器分别调节其5次谐波电流至6 A和9 A,5次谐波电压被有效地控制在4 V以内,而7次谐波电压未超过阈值所以7次谐波电流均未改变。0.8 s时刻,切除2条非线性负载支路,PCC处5次谐波电压低于下阈值,2台逆变器分别调节5次谐波电流至4 A和6 A。整个过程中,5、7次谐波电压有效值均控制在上、下阈值之间。图6(b)中 U_{L50} 和 U_{L70} 分别为同样工况下未采用谐波下垂控制PCC处的5次谐波电压和7次谐波电压,从中可见,采用谐波下垂控制后,各谐波电压都有较大幅度的减小。由图6(c)、(d)可见,除了短时间的调节过程,两逆变器的谐波有功功率均按逆变器容量分配,而谐波无功功率均控制为0,符合第1节的理论。图6(e)、(f)为0.3~0.34 s内2台逆变器的输出电流波形图。

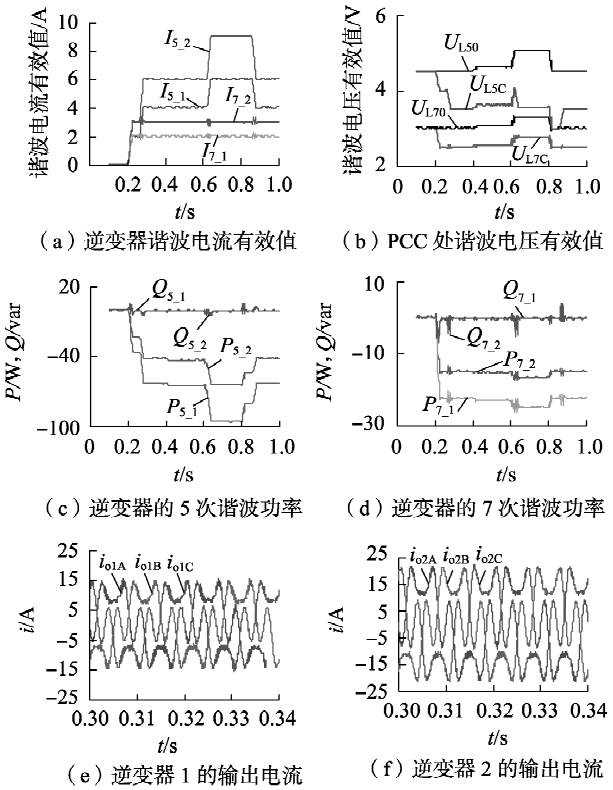
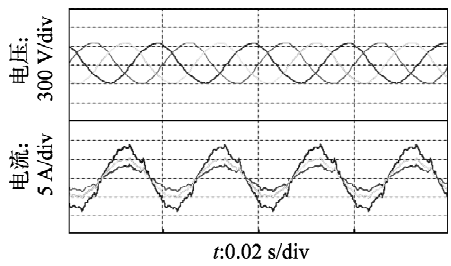


图6 仿真结果

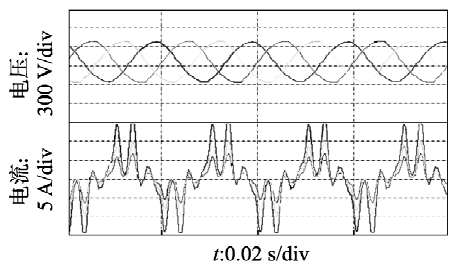
Fig.6 Simulative results

为了进一步验证本文所提方法,研制了2台10 kW三相三线制逆变器样机,其直流侧分别由2套340 V蓄电池组经Boost电路供电,Boost电路的输入电感为0.84 mH,逆变器直流侧电容 $C_{dc1}=C_{dc2}=150$ μF,LCL滤波器参数为 $L_{LCL1}=0.74$ mH,$C_{LCL}=6.6$ μF,$L_{LCL2}=55$ μH。电流互感传感器采用Allegro公司的ACS758LCB-050B-PFF-T,而电压传感器采用电阻分压采样,两者的精度基本可以满足要求。数字控制系统的主控DSP芯片为TI公司的TMS320F28335。实验记录仪器使用3196电能质量分析仪。由于实验室没有大功率的非线性负载,受实验条件的约束,实验中用2台逆变器样机并于电网进行相关实验,PCC处不接负载,但仍可通过对电网自带背景谐波电压的抑制作用验证本文所提策略。为了突出功率分配的效果,实验中假设2台逆变器的容量比为2:3。其中Boost电路控制蓄电池的输出功率,逆变器1为2 kW,逆变器2为3 kW,而逆变器直流侧电容电压由逆变器基波电流控制。自适应谐波下垂控制参数如下:5次谐波电压上阈值 U_{5setH} 设为2 V,7次谐波电压上阈值设为 U_{7setH} 设为1.5 V,5、7次谐波电压下阈值电压均设为0.5 V,逆变器1下垂增量系

数 k_1 设为 1，逆变器 2 下垂增量系数 k_2 设为 1.5，自适应下垂增量值 ΔI_{set} 设为 0.5 A。另外，下垂系数自适应调节器的调节步长设为 3 s，使得 3196 电能质量分析仪能检测到谐波电压的调节过程，调节器在 14 s 时刻启动。为了对比 2 台逆变器的输出电流，3 个电流钳分别箝位在逆变器 1、逆变器 2 和汇流线的 B 相输电线路，实验波形如图 7 所示。从图 7 可见，基于本文所提控制策略的逆变器不再单纯输出基波电流，还包含与需抑制谐波电压相同次数且大小与逆变器容量成比例的谐波电流。该输出电流波形与仿真中的波形有所差异，这主要是因为两者的系统谐波电阻 R_{heq} 以及所设定的谐波电压阈值均是有差异的。3196 电能质量分析仪记录的调节过程如图 8、9 所示。14 s 之前，未启动谐波下垂控制，PCC 处 5 次谐波电压和 7 次谐波电压均超过所设阈值；14 s 启动谐波下垂控制，经过 3 个步长的调节，谐波电压均抑制在阈值范围内。从图 9 可见，调节完成后 2 台逆变器的谐波电流均与容量成比例。谐波下垂控制使能前、后 PCC 处电压频谱分别如附录 C 中图 C1 和图 C2 所示。从图 C1、图 C2 可知，使用本文所提控制策略后，5 次谐波电压由 2.65 V 降至 1.52 V、7 次谐波电压由 2.26 V 降至 1.22 V，两者均降至所设上阈值电压之下。从上述实验结果可见，本文所提控制策略对 PCC 处谐波电压产生了抑制作用，并能限制其在设定范围内。



（a）未采用谐波下垂控制波形



（b）采用谐波下垂控制波形

图 7　电压、电流波形图

Fig.7　Voltage and current waveforms

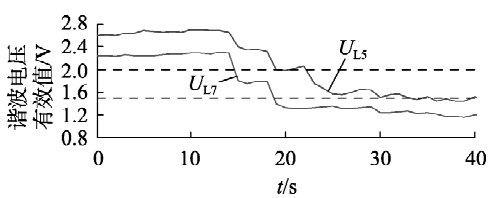


图 8　PCC 处谐波电压变化

Fig.8　Harmonic voltage at PCC

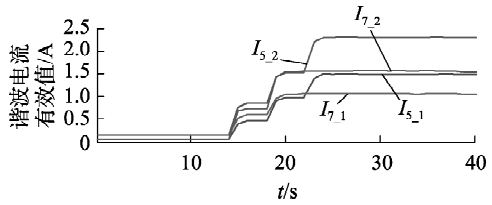


图 9　逆变器谐波电流变化

Fig.9　Harmonic current of inverters

4　结论

本文提出、设计了低压微网逆变器自适应谐波下垂控制策略，通过第 1 节的数学建模、理论分析，初步证明该策略能使 PCC 处谐波电压抑制在设定范围内，并能使各逆变器按容量分配谐波功率，同时 PSCAD 仿真结果和实验平台的实验结果都得到了与理论分析相同的效果，进一步验证了该策略的有效性。

基于基波的鲁棒性下垂控制研究已逐渐成熟，而本文所提策略也是基于其在调压调频的同时能按容量精确分配各并联逆变器功率的基本原理进行设计的，但不同于已有文献的是：本文所提策略的控制目标是谐波电压和谐波功率，并根据鲁棒性下垂控制应用于谐波控制额定工况的特殊性进行了简化设计，在此基础上，还设计了下垂系数自适应调节策略和多准 PR 电流跟踪方案。

针对多台并联逆变器对 PCC 进行电压谐波治理的应用场合，本文所提控制策略较其他方法具有以下优点：

a. 各逆变器独立、自治地参与微网谐波治理，无需通信线和负载电流传感器，节省成本，谐波治理功能即插即同；

b. 可适应不同大小的系统侧谐波源和非线性负载，通过自适应控制使 PCC 处谐波电压抑制在设定范围内；

c. 各逆变器治理谐波电压所吸收的谐波功率按容量分配。

本文所提策略在典型低压微网谐波抑制上不仅具有较高的工程价值，而且易于实现，但该策略只适用于所有逆变器都并联于同一 PCC 的工况，不能应用于微网其他更为复杂的拓扑结构。针对上述存在的问题，笔者下一步将结合模糊控制和谐波下垂控制进行研究，以减小本文所提策略对 PCC 处谐波电压反馈的依赖。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献:

[1] 曹一家,郑玉芳,于晶荣,等. 微电网弱约束容性等效输出阻抗逆变器控制方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):1-4,10.
CAO Yijia,ZHENG Yufang,YU Jingrong,et al. Weakly-constrained control of microgrid inverter with capacitive equivalent output impedance[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):1-4,10.

[2] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.

[3] KO S H,LEE S R,DEHBONEI H,et al. A grid-connected photovoltaic system with direct coupled power quality control[C]// IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris,France:IEEE,2006:5203-5208.

[4] 周林,曾意,郭珂,等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(9):137-145.
ZHOU Lin,ZENG Yi,GUO Ke,et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control,2012,40(9):137-145.

[5] 吴春华,黄建明,陈卫民,等. 单相光伏并网与有源滤波的统一控制[J]. 电工技术学报,2011,26(10):103-109.
WU Chunhua, HUANG Jianming, CHEN Weimin, et al. Unified control of single phase photovoltaic grid-connected and active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(10):103-109.

[6] 张杰,郭晓霞,赵威. 光伏并网与有源滤波统一控制系统的研究[J]. 现代电力,2015,32(1):64-69.
ZHANG Jie,GUO Xiaoxia,ZHAO Wei. Unified control of grid-connected photovoltaic and active power filter[J]. Modern Electric Power,2015,32(1):64-69.

[7] 郭珂,曾意,刘强,等. LCL 滤波器在具有有源滤波功能的光伏并网系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(3):73-79.
GUO Ke,ZENG Yi,LIU Qiang,et al. Application of LCL-filter in photovoltaic grid-connected system with active power filter function[J]. Power System Protection and Control,2013,41(3):73-79.

[8] 谭兴国,冯高明,王辉,等. 兼顾有源滤波的三相四开关光伏并网逆变器[J]. 高电压技术,2014,40(11):3590-3596.
TAN Xingguo, FENG Gaoming, WANG Hui, et al. Three-phase four-switch grid-connected photovoltaic inverter combined with active power filter[J]. High Voltage Engineering,2014,40(11):3590-3596.

[9] 彭自强,罗安,陈燕东,等. 基于分频虚拟电阻的多逆变器并联控制策略[J]. 电网技术,2013,37(11):3276-3280.
PENG Ziqiang, LUO An, CHEN Yandong, et al. A frequency-divided virtual resistance based control strategy for multi parallel inverters[J]. Power System Technology,2013,37(11):3276-3280.

[10] WANG X, BLAABJERG F, CHEN Z. Autonomous control of inverter-interfaced distributed generation units for harmonic current filtering and resonance damping in an islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(1):452-461.

[11] WANG X,BLAABJERG F,CHEN Z. Synthesis of variable harmonic impedance in inverter-interfaced distributed generation unit for harmonic damping throughout a distribution network[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(4):1407-1417.

[12] HE Jinwei,LI Yunwei,BOSNJAK D,et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(1):234-246.

[13] AKAGI H. Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systens[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1997,12(1):354-363.

[14] 吕志鹏,罗安. 不同容量微源逆变器并联功率鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(12):35-42.
LÜ Zhipeng, LUO An. Robust power control of paralleled microsource inverters with different power ratings[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(12):35-42.

[15] 陈燕东,罗安,龙际根,等. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒下垂多环控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(18):18-29.
CHEN Yandong, LUO An, LONG Jigen, et al. Circulating current analysis and robust droop multiple loop control method for parallel inverters using resistive output impedance[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(18):18-29.

[16] DE BRABANDERE K,BOLSENS B,VAN dEN KEYBUS J,et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4):1107-1115.

[17] 张庆海,彭楚武,陈燕东,等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):126-132.
ZHANG Qinghai, PENG Chuwu, Chen Yandong, et al. A control strategy for parallel operation of multi inverters in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):126-132.

[18] LI Y W,KAO C N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(12):2977-2988.

[19] 雷亚雄,李建文,李永刚. 基于准 PR 调节器电流双闭环 LCL 三相并网逆变器控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):44-50.
LEI Yaxiong, LI Jianwen, LI Yonggang. Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster[J]. Power System Protection and Control,2014,42(12):44-50.

[20] 王亮,王冰,黄存荣. 基于多 PR 控制的并网逆变器设计与参数整定[J]. 电网与清洁能源,2014,30(7):45-51.
WANG Liang,WANG Bing,HUANG Cunrong. Design and parameter tuning of grid-connected inverters based on multi-resonant PR controller[J]. Power System and Clean Energy,2014,30(7):45-51.

作者简介:


黄骏翅

黄骏翅(1993—),男,广东东莞人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制(**E-mail**:461532079@qq.com);

曾　江(1972—),男,江西萍乡人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制(**E-mail**:Zengxy@scut.edu.cn);

杨　林(1993—),男,广东湛江人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制(**E-mail**:1083308857@qq.com)。

(下转第 226 页 continued on page 226)

Estimation method of meteorological sensitive load power based on correlation analysis and stacked auto-encoder

CHEN Yanxiang[1,2], QIN Chuan[1,2], JU Ping[1,2], ZHAO Jingbo[3], JIN Yuqing[1,2], SHI Jiajun[1,2]

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Renewable Energy Power Generation Technology Engineering Research Center of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: The annual increase of meteorological sensitive load is an important reason for the increasing load of grid in summer and correct estimation of such load power is beneficial to the operation scheduling of power grid and the estimation of regional demand side response. An improved typical correlation analysis method is proposed, and a load-meteorology nonlinear correlation model is established, based on which, the meteorological sensitive load power in the historical load data can be calculated. An estimation model of meteorological sensitive load based on SAE (Stacked Auto-Encoder) is established. The unsupervised learning ability of SAE is utilized to extract the dimension reduction characteristics of daily load curve, and the calculative results of the correlation model is used as a label sample to train the full connection layers of the estimation model, thus the meteorological sensitive load power curve can be obtained directly by the daily load curve. Results of an example based on actual grid data verify the validity of the proposed methods.

Key words: meteorological sensitive load; power estimation; correlation analysis; load-meteorology correlation model; stacked auto-encoder

(上接第 210 页 continued from page 210)

Adaptive harmonic droop control strategy of low-voltage microgrid inverter

HUANG Junchi, ZENG Jiang, YANG Lin, HUANG Zhonglong

(School of Electric Power, South China Unverisity of Technology, GuangZhou 510640, China)

Abstract: In the typical low-voltage microgrid with multiple distributed generation inverters connected in parallel at the same PCC(Point of Common Coupling), it's difficult to coordinately suppress the harmonic voltage of PCC without communication lines among inverters, so an adaptive harmonic droop control strategy for the inverters is proposed. The block diagram of Robust harmonic droop control is established and analyzed by introducing the idea of the fundamental Robust droop control to harmonic control, which is simplified according to the particularity of the rated condition. On this basis, the adaptive adjustment strategy of droop coefficients based on the detection of harmonic voltage of PCC and the multi quasi-PR (Proportional Resonant) current tracking scheme are designed. The parallel operation of two inverters is constructed in the PSCAD simulation software to verify the proposed strategy, and simulative results show that the adaptive harmonic droop control strategy can restrain the harmonic voltage of PCC in the given range, and allocate the harmonic power according to the capacity of each inverter. An experimental platform for grid-connected operation of two inverters is built to further verify the effectiveness of the proposed strategy, and results show that the proposed control strategy can make the inverters participate in the power quality improvement of microgrid independently and autonomously and suppress the harmonic voltage of PCC according to their capacities without communication lines and load current sensors.

Key words: low-voltage microgrid; electric inverters; harmonic suppression; droop control; harmonic power

附录 A

多逆变器并联的典型微网等效电路如图 A1 所示。在微网等效电路中，逆变器用基波电压源 $E_k\angle\varphi_k$、谐波电压源$\sum E_{kh}\angle\varphi_{kh}$和输出阻抗 Z_{ok}串联表示，系统用基波电压源 $E_{\mathrm{s}}\angle\varphi_{\mathrm{s}}$、谐波电压源$\sum E_{sh}\angle\varphi_{sh}$和系统阻抗 Z_{g}串联表示，逆变器经线路阻抗 $Z_{\mathrm{line}k}$连接至 PCC，负载分别用恒定阻抗 Z_{L}和谐波电流源$\sum I_h\angle\varphi_h$等效替换线性部分和非线性部分。图中，u_{ok}为逆变器的输出电压；U_{L}为 PCC 处电压；$k=1,2,\cdots,m$为逆变器序号；h为谐波次数。

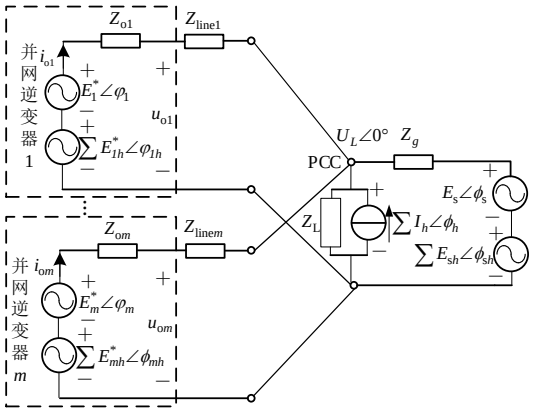
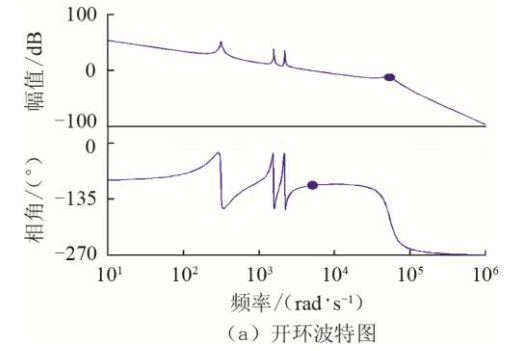


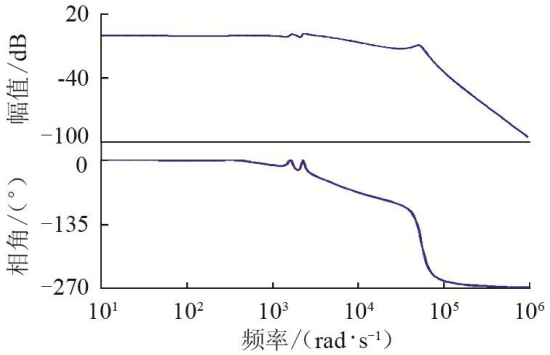
图 A1 典型微网等效电路

Fig.A1 Equivalent circuit of typical microgrid

附录 B



（a）开环波特图



（b）闭环波特图

图 B1 系统波特图

Fig.B1 Bode diagram of system

附录 C

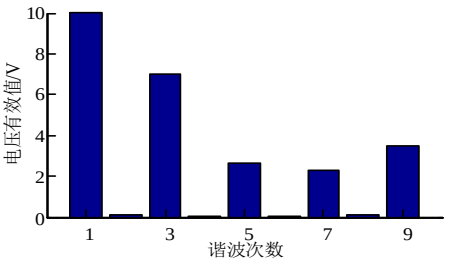


图 C1 未使能谐波下垂控制电压频谱

Fig.C1 Voltage spectrum of PCC without harmonic droop control

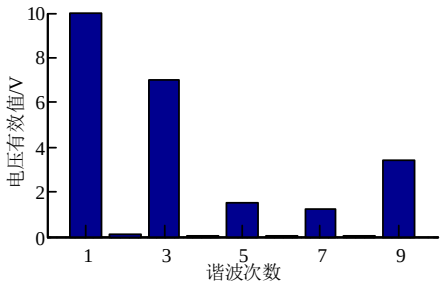


图 C2 使能谐波下垂控制电压频谱

Fig.C2 Voltage spectrum of PCC with harmonic droop control