基于下垂控制的微电网变流器并网运行控制方法改进

梁建钢,金新民,吴学智,童亦斌
(北京交通大学 国家能源主动配电网技术研发中心,北京 100044)

摘要:基于下垂三环控制的微电网变流器并网运行时,电网电压存在的谐波分量将恶化微电网变流器输出电流。在不增加下垂三环控制环节的基础上,通过对传统控制方法中电压控制环的改进,提出一种简单有效地抑制微电网变流器输出电流谐波的方法。分析了传统下垂三环控制策略输出电流谐波产生的原理,将传统策略中电压调节器进行相应重组,在不影响基波输出阻抗的前提下增大微电网变流器对应谐波阻抗。分析了谐波调节环节谐振系数和截止角频率与抑制精度和抑制带宽的关系。仿真和实验结果表明,在相同电网谐波环境下改进方法能将微电网变流器对应输出谐波电流约降低至传统方法的 15%,验证了该方法的正确性和可行性。

关键词:微电网;变流器;下垂控制;电压调节器;电流调节器;电压控制;谐波分析
中图分类号:TM 46 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.011

0 引言

近年来,光伏、风电等处于电力系统末梢的间歇性分布式电源在电网中大量接入,可能造成电力系统不可控甚至不稳定,影响电网安全运行,反之也阻碍了光伏、风电等新能源的进一步发展。微电网作为一种可以充分发挥分布式发电优势、消除分布式发电对电网冲击和负面影响的网络拓扑受到越来越多的关注[1]。另一方面,微电网能够实现电能“就地消费”,可以解决目前我国偏远地区常规供电输电距离远、功率小、线损大、建设变电站昂贵等问题,是一种为边远地区或无电地区提供可靠供电的实现方式[2]。

微电网中分布式电源大部分需通过电力电子装置(变流器)将产生的电能并入电网。微电网中的变流器主要分为 3 类:grid-feeding 变流器、grid-forming 变流器和 grid-supporting 变流器[3]。grid-feeding 变流器需要外部电源提供电压和频率支撑,不能单独运行;grid-forming 变流器只能运行于孤岛状态,且只能单独运行;grid-supporting 变流器采用模拟传统同步发电机的下垂控制方式,既可并网运行,也可孤岛运行。本文重点针对 grid-supporting 变流器(下称微电网变流器)的控制策略展开。

微电网变流器必须具备在并网和孤岛 2 种模式下稳定运行的能力。孤岛工况下微电网系统稳定性[4]、并联微电网变流器有功和无功合理分配[5]以及微电网并网和孤岛无缝切换[6]等是目前微电网变流器控制策略研究的重点。对于微电网变流器并网运行,尤其是弱电网工况下微电网变流器并网谐波电流抑制等方面,只有较少文献涉及。文献[7]提出根据电网电压谐波检测分量相应改变电压调节器指令,可以实现微电网变流器并网谐波电流的抑制,但是该方法需要实时检测电网电压中各次谐波分量,运算量大幅增加。文献[8]提出基于谐波虚拟阻抗的思想,检测微电网变流器输出电流各次谐波分量,并与谐波虚拟阻抗相乘后增加至电压调节器指令,降低了微电网变流器输出电流中谐波分量,但是此方法同样需要对输出电流中各次谐波分量进行准确测量,增加了运算量。

本文基于传统微电网变流器功率环、电压环、电流环的下垂控制方式(简称下垂三环控制),不增加额外控制环节,通过对电压控制环节的改进来实现对输出电流谐波分量的抑制,进而提出了一种弱电网工况下简单有效地抑制微电网变流器输出电流谐波的方法。文中介绍了微电网变流器传统下垂三环控制原理,分析了弱电网工况下输出电流谐波产生的原因,提出了改进的方法,并对改进环节的设计和参数选取进行了分析,最后进行了仿真和实验验证。

1 下垂三环控制原理

1.1 下垂控制原理

以图 1 微电网变流器并网运行电路为例进行分析。图中直流输入电压由光伏和储能等环节提供,L_f、C_f 和 L_g 分别为微电网变流器滤波电感、滤波电容和并网电感,Z_{line} 为并网线路阻抗。

图 1 中微电网变流器并网运行等效电路如图 2 所示。$E\angle\varphi$ 为微电网变流器等效输出电源,$U\angle 0°$ 为电网等效电源,Z_{out} 为微电网变流器闭环控制等效输出阻抗。本文以采用虚拟阻抗控制的微电网变流器为研究对象[9],$Z_{virtual}$ 为等效虚拟阻抗。

微电网变流器采用 P-f、Q-U 下垂控制方式有

收稿日期:2013-11-11;修回日期:2013-12-16
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A306)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A306)

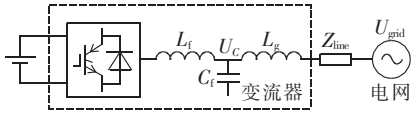


图1 微电网变流器并网运行电路

Fig.1 Circuit of grid-connection operation of microgrid converter

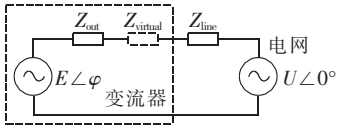


图2 图1中微电网变流器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of microgrid converter in Fig.1

助于更好地实现不同分布式电源之间负荷功率共享[10]。调节控制参数改变图2中Z_{out}和$Z_{virtual}$可以使$Z(Z=Z_{out}+Z_{virtual}+Z_{line})$呈现纯感性[9]。则有：

$$\begin{cases} P=\dfrac{EU\sin\varphi}{Z}\approx\dfrac{EU}{Z}\varphi \\ Q=\dfrac{EU\cos\varphi-U^2}{Z}\approx\dfrac{U}{Z}(E-U) \end{cases} \tag{1}$$

可见，调节微电网变流器输出角频率($\omega=\mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}t$)可以对有功功率进行控制，调节输出电压幅值可以对无功功率进行控制，建立下垂控制方程如式(2)所示：

$$\begin{cases} \omega^*=\omega_N-mP_N \\ E^*=E_N-nQ_N \end{cases} \tag{2}$$

其中，ω_N为额定角频率；E_N为额定电压幅值；m和n为下垂系数；P_N、Q_N为额定功率；ω^*为输出角频率；E^*为输出电压幅值。

1.2 下垂三环控制并网运行实现方式

基于功率环、电压环和电流环的下垂三环控制方式是目前微电网变流器典型控制方式[11-14]，并网控制框图如图3所示，运行原理及各控制环节参数的选择等可参见文献[14]。

2 弱电网运行问题分析及改进方法

2.1 问题分析

由于大量非线性负载的接入，弱电网中存在大量谐波分量，电压质量很难保证为理想状态，这将对采用图3控制框图的微电网变流器并网运行输出的电能质量产生不利影响。

现以电网电压中h次谐波分量为例进行分析，结合图2和图3可得并网状态下微电网变流器h次谐波等效电路如图4所示。

图4中，$E(h)$为微电网变流器h次谐波等效输出电源，图3中有功功率和无功功率计算需要经过较大的滤波环节[14]，且下垂控制只针对基波功率进行控制，图3中$U^*_{\alpha\beta}$为理想基波正弦量，因此图4中$E(h)$为0；$U(h)$为电网电压中h次谐波分量；Z_{out}、$Z_{virtual}$和Z_{line}与图1中对应量含义相同。

由图4可得，当电网电压中h次谐波分量为$U(h)$时，微电网变流器输出h次谐波电流为：

$$I(h)=\frac{-U(h)}{Z_{out}+Z_{virtual}+Z_{line}} \tag{3}$$

当线路阻抗一定时，通过增加虚拟阻抗$Z_{virtual}$可以减小微电网变流器h次谐波电流，但是由于并网运行稳定性和功率解耦等方面的考虑，虚拟阻抗$Z_{virtual}$有一定的取值范围[9]，因此采用图3控制框图运行的微电网变流器在弱电网工况下难以有效抑制输出谐波电流，尤其对于中小功率的微电网变流器，难以满足分布式电源的并网标准[15]。

2.2 改进方法

文献[16]提出采用一种交叉解耦滤波器来测量电网电压中的基波和各次谐波分量。以基波测量为例，该滤波器技术在保证对基波分量增益的同时能够抑制对各次谐波分量的响应，实现了基波分量的准确测量。

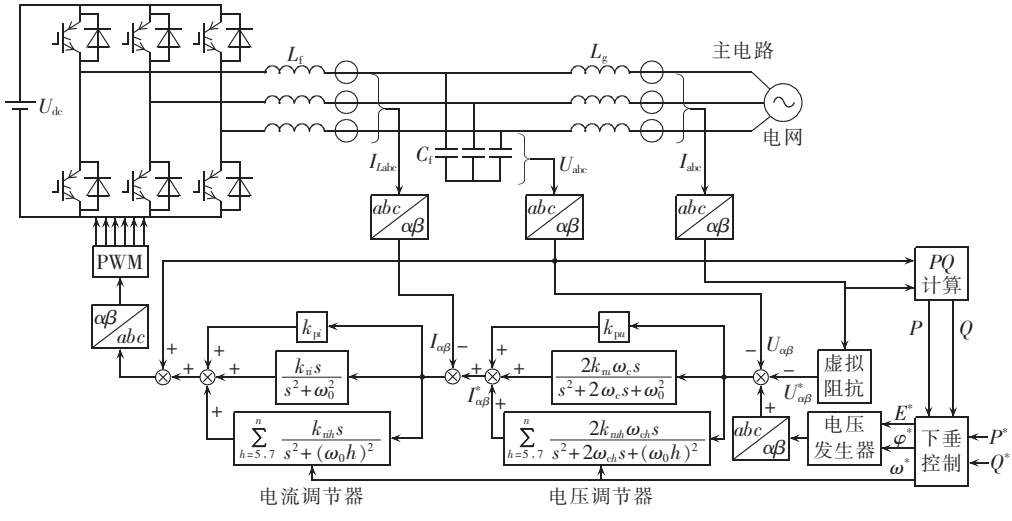


图3 微电网变流器并网运行控制框图

Fig.3 Block diagram of grid-connected converter control

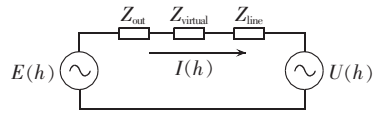


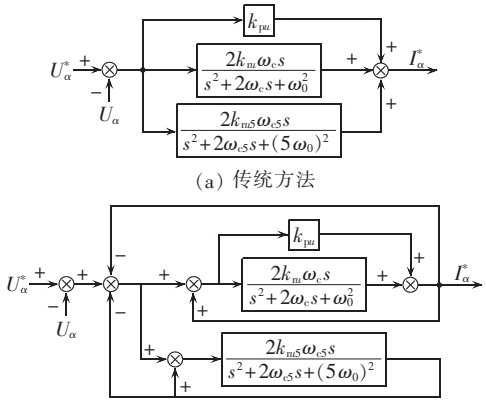
图 4 微电网变流器并网运行 h 次谐波等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of h-th harmonic

参考传统并网变流器采用比例谐振(PR)控制器抑制输出电流谐波的方法[17]，图 3 基于下垂三环控制的微电网变流器在弱电网工况下抑制并网电流谐波的根本在于电压调节器保证对基波电压控制的基础上抑制对谐波电压的响应，这也是文献[7-8]中电流谐波抑制方法的间接效果，而这与文献[16]滤波器的实现目标类似。

基于上述电流谐波抑制的思想，本文在不增加下垂三环控制环节的基础上，参考文献[16]中滤波器各环节设计，通过对图 3 中电压调节器基波和各次谐波调节环节的重组，提出了一种简单有效地抑制微电网变流器并网输出电流谐波的方法。该方法仅在电压调节器现有基础上进行适当改进，能够有效抑制电压调节器对电网谐波电压的响应，进而有效抑制并网输出谐波电流，且不会对基波电流的控制性能产生影响。

本文提出的电压调节器改进方法如图 5 所示，以抑制 5 次谐波电流为例进行分析。



(a) 传统方法

(b) 改进方法

图 5 电压调节器改进方法

Fig.5 Improvement of voltage regulator

图 5 中 U_α^*、U_α 和 I_α^* 与图 3 中含义相同；k_{pu} 为基波比例系数；k_{ru} 为基波谐振系数；k_{ru5} 为 5 次谐波谐振系数；ω_0 为电网电压基波角频率；ω_c 为基波截止角频率；ω_{c5} 为 5 次谐波截止角频率。

采用图 5 中传统控制方式时：

$$\begin{cases} \dfrac{I_\alpha^*}{U_\alpha^*-U_\alpha}=A+B+C \\ A=k_{pu} \\ B=\dfrac{2k_{ru}\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2} \\ C=\dfrac{2k_{ru5}\omega_{c5} s}{s^2+2\omega_{c5} s+(5\omega_0)^2} \end{cases} \tag{4}$$

采用图 5 中改进控制方式时：

$$\begin{cases} \dfrac{I_\alpha^*}{U_\alpha^*-U_\alpha}=\dfrac{(A+B)(1-C)}{1-(A+B)C} \\ A=k_{pu} \\ B=\dfrac{2k_{ru}\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2} \\ C=\dfrac{2k_{ru5}\omega_{c5} s}{s^2+2\omega_{c5} s+(5\omega_0)^2} \end{cases} \tag{5}$$

图 6 所示为图 5 电压调节器传统方法和改进方法的幅频和相频特性曲线。由图 6 可以看出，相对于传统方法，电压调节器改进方法能够在保证基波增益的基础上实现 5 次谐波分量的抑制。

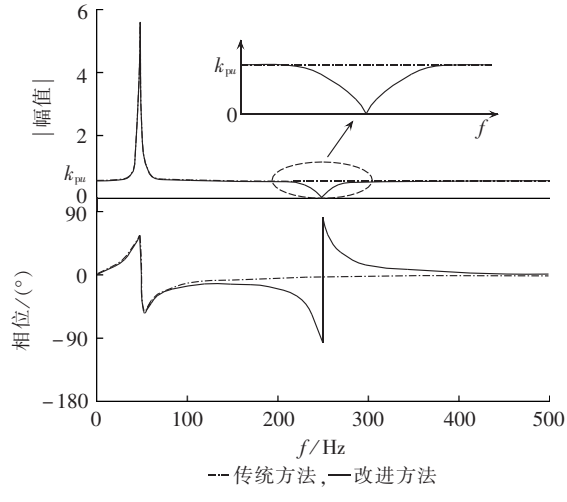


图 6 电压调节器传统和改进方法幅频和相频特性

Fig.6 Amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of traditional and improved voltage regulators

图 7 所示为图 3 微电网变流器采用改进方法等效输出阻抗幅频特性。与文献[9]对比可以看出，图 5 改进方法在不影响基波输出阻抗的前提下增大了图 4 中微电网变流器 h 次谐波阻抗 Z_{out}，根据式(4)，减小了微电网变流器输出 h 次谐波电流，从输出阻抗的角度对改进方法进行了验证。

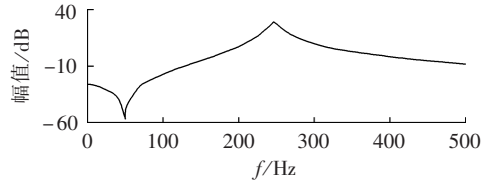


图 7 改进方法微电网变流器输出阻抗 Z_{out} 幅频特性

Fig.7 Amplitude-frequency characteristic of improved microgrid converter output impedance

2.3 改进方法控制参数选择

本节以 5 次谐波为例，重点分析谐波控制环节中 5 次谐波谐振系数 k_{ru5} 和截止角频率 ω_{c5} 的选取。

本文第 2.2 节中电压调节器改进的思想是抑制 5 次谐波响应，即式(5)在 $5\omega_0$ 处的增益绝对值应为 0。将式(5)展开并将 s=j$5\omega_0$ 代入可得式(6)：

$$\left|\frac{I_\alpha^*}{U_\alpha^*-U_\alpha}\right|=\left|\frac{(A+B)(1-C)}{1-(A+B)C}\right|=\frac{\left|k_{pu}[(j5\omega_0)^2+2\omega_c(j5\omega_0)+\omega_0^2]+2k_{ru}\omega_c(j5\omega_0)\right|\left|(j5\omega_0)^2+2\omega_{c5}(j5\omega_0)+(5\omega_0)^2-2k_{ru5}\omega_{c5}(j5\omega_0)\right|}{\left|[(j5\omega_0)^2+2\omega_c(j5\omega_0)+\omega_0^2][(j5\omega_0)^2+2\omega_{c5}(j5\omega_0)+(5\omega_0)^2]-\{k_{pu}[(j5\omega_0)^2+2\omega_c(j5\omega_0)+\omega_0^2]+2k_{ru}\omega_c(j5\omega_0)\}2k_{ru5}\omega_{c5}(j5\omega_0)\right|} \tag{6}$$

由于式(6)传递函数分子第1项绝对值恒不为0,当且仅当分子第2项绝对值为0时,式(6)绝对值为0。计算可得,当$k_{ru5}=1$时,式(6)传递函数在$5\omega_0$处的增益绝对值为0。

基于仿真和实验实际基波控制环节参数($k_{pu}=0.5$、$k_{ru}=5$、$\omega_c=6.28$ rad/s),图8所示为$\omega_{c5}=2\pi$ rad/s、k_{ru5}变化时,改进电压调节器的幅频和相频特性曲线。从图8可以看出,当且仅当$k_{ru5}=1$时,改进电压调节器能够实现对5次谐波分量的零增益抑制,对上述理论分析进行了验证。

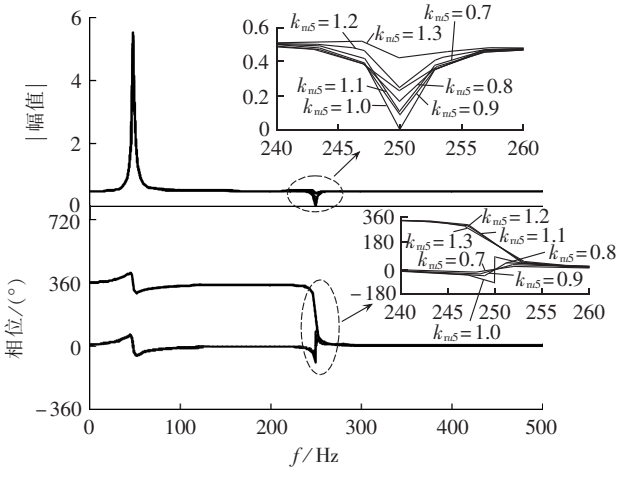


图8 当k_{ru5}变化时改进电压调节器幅频和相频特性

Fig.8 Amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of improved voltage regulator when k_{ru5} changes

根据传统方法中电压基波谐振环节带宽的设计方法,可以假设式(5)传递函数中B部分的幅频特性曲线在$5\omega_0$附近的幅值约为0,则当角频率在$5\omega_0$附近时,式(5)可改写为:

$$\begin{cases}\dfrac{I_\alpha^*}{U_\alpha^*-U_\alpha}=1+\dfrac{A-1}{1-AC}\\ A=k_{pu}\\ C=\dfrac{2k_{ru5}\omega_{c5}s}{s^2+2\omega_{c5}s+(5\omega_0)^2}\end{cases} \tag{7}$$

其中,A为常数;C为准谐振环节,C在$5\omega_0$附近的带宽可由ω_{c5}来调节[18],因此通过调节ω_{c5}可以调节式(7)对5次谐波抑制的带宽。

图9所示为$k_{ru5}=1$、ω_{c5}变化时,改进电压调节器的幅频和相频特性曲线。从图9可以看出,随着ω_{c5}不断增加,改进电压调节器对5次谐波抑制的带宽不断增加,对上述理论分析进行了验证。

基于图8、图9幅频和相频特性曲线,在不影响电压调节器对电压基波分量调节性能基础上,可适

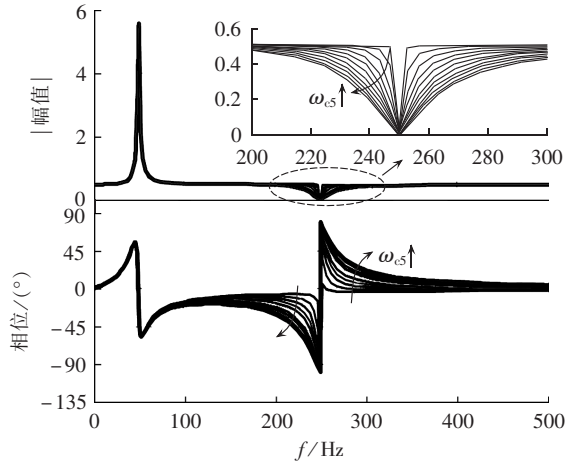


图9 当ω_{c5}变化时改进电压调节器幅频和相频特性

Fig.9 Amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of improved voltage regulator when ω_{c5} changes

当增大对5次谐波抑制的带宽,本文选择$k_{ru5}=1$、$\omega_{c5}=25\times2\times\pi$ rad/s作为下述仿真和实验的参数。

本节仅以抑制5次谐波为例对改进电压调节器参数设计进行了分析,对其他次谐波的抑制思想与此相同,参数设计方法类似,本文不再赘述。

3 仿真和实验结果

3.1 仿真结果

基于MATLAB/Simulink仿真软件搭建了微电网变流器仿真模型,如图10所示。仿真模型参数如下(硬件参数选择为实际变流器参数,本文不讨论硬件参数的选择方法):电网参数,电网电压$U=380$ V,电网频率$f=50$ Hz,5次谐波为1%,7次谐波为1%;变流器参数,滤波电感$L=10$ mH,滤波电容$C=12$ μF,并网电感为150 μH,开关频率为8 kHz;电压环控制参数,$k_{pu}=0.5$,$k_{ru}=5$,$\omega_c=1\times2\times\pi$ rad/s,$\omega_0=50\times2\times\pi$ rad/s,$k_{ru5}=1$,$\omega_{c5}=25\times2\times\pi$ rad/s,$k_{ru7}=1$,$\omega_{c7}=25\times2\times\pi$ rad/s。基于仿真模型对上述采用下垂控制的微电网变流器并网运行改进控制进行了验证。

图11所示为电网中存在5、7次谐波分量时,图

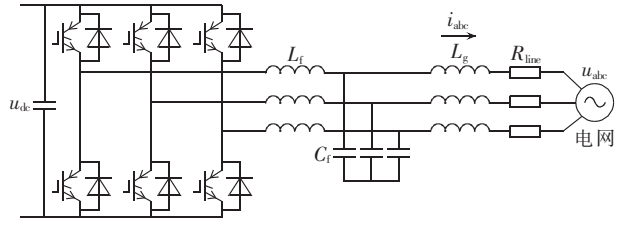
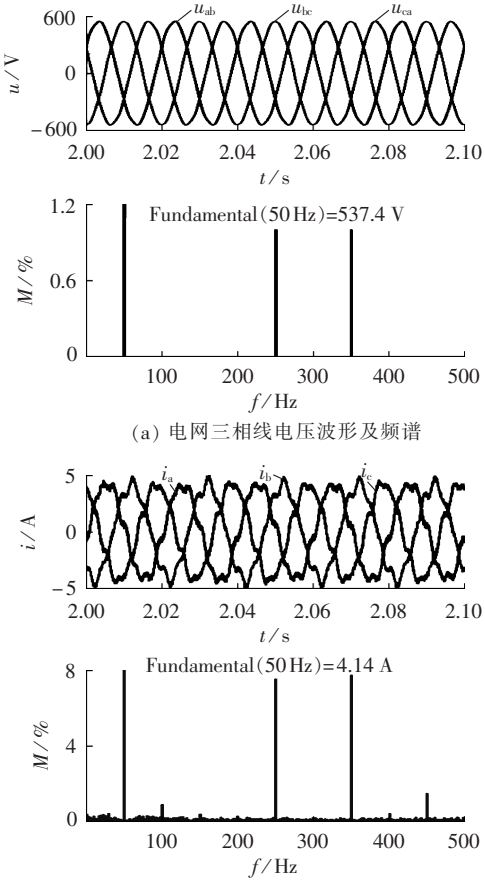


图10 仿真模型

Fig.10 Simulation model

10 仿真模型采用传统下垂三环控制方法输出功率为 2 kW 时对应电网电压和输出电流波形。从图 11(b)可以看到,当电网中存在谐波分量时,采用传统下垂三环控制方法的微电网变流器输出电流波形畸变,5、7 次谐波分量明显。



(a) 电网三相线电压波形及频谱

(b) 微电网变流器输出三相电流波形及频谱

图 11 传统控制方法仿真波形及频谱

Fig.11 Simulative waveforms and spectrum of traditional control method

图 12 为在图 11(a)电网电压工况下采用改进下垂三环控制方法(电压调节器 5、7 次抑制)输出功率为 2 kW 时输出电流波形。对比图 12 和图 11(b)电流波形,可以看出,采用改进下垂三环控制方法可以显著降低并网电流 5、7 次谐波分量,仿真结果对理论分析进行了验证。

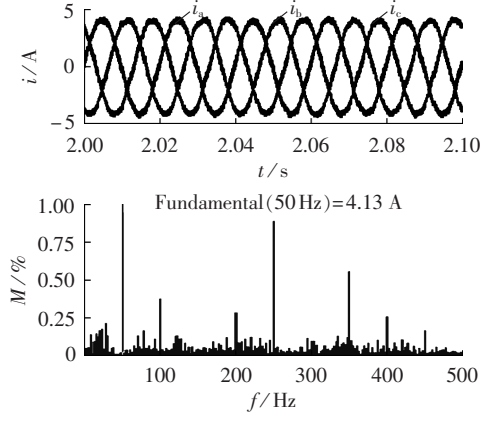


图 12 改进控制方法仿真波形及频谱

Fig.12 Simulative waveforms and spectrum with improved control method

3.2 实验结果

基于由 dSPACE 控制的 2 台 3 kW 变流器组成的实验平台进行了实验验证。其中一台采用基于同步旋转坐标系双闭环控制策略,提供直流电源;另一台采用下垂三环控制策略。3 kW 变流器拓扑与图 10 仿真模型一致,参数相同。

图 13 所示为微电网变流器在实际电网工况下采用传统控制方法输出 2 kW 时对应电压和电流波形。可以看出,电网电压中存在比较明显的 5、7 次谐波分量。采用传统控制方法时,微电网变流器输出电流畸变,5、7 次谐波分量明显。

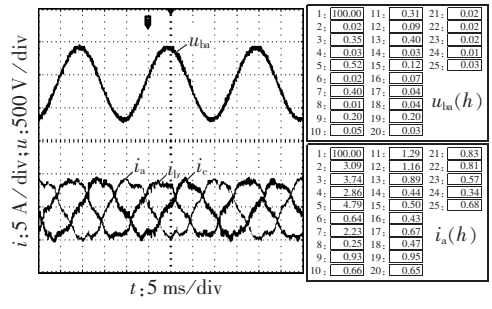


图 13 传统控制方法实验波形

Fig.13 Experimental waveforms of traditional control method

图 14 所示为微电网变流器在图 12 电网工况下采用改进控制方法输出 2 kW 时对应电压和电流波形。对比图 13 和图 14 可以看出,采用改进下垂三环控制方法(电压调节器 5、7 次抑制)可以显著降低并网电流 5、7 次谐波分量。由于未对 9、11 次电压谐波进行抑制,从图 14 可以看出,输出电流 9、11 次谐波分量依然明显,从另一个方面对改进方法进行了验证。

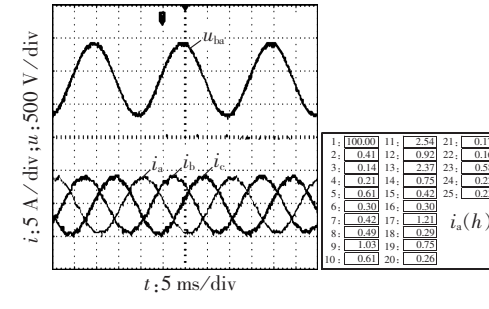


图 14 改进控制方法实验波形

Fig.14 Experimental waveforms of improved control method

本文实验结果与仿真结果表现基本一致,实验结果对上述理论分析和仿真研究进行了验证。

4 结论

本文提出了基于下垂三环控制的微电网变流器

并网控制策略改进方法,对改进环节的参数设计进行了分析。仿真和实验研究表明本文所提出的改进方法能够有效解决由于电网背景谐波所引起的变流器电流谐波问题,未增加额外控制环节,实现简单。相对于文献[7-8]中微电网变流器输出电流谐波抑制方法,本文方法避免了由于电网谐波检测精度所引起的问题,无需增加检测环节,运算量小,且易于工程实际应用。

参考文献:

[1] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):120-123.
WANG Shaoyong. Design and operation of microgrid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(4):120-123.

[2] 袁越,曹阳,傅质馨,等. 微电网的节能减排效益评估及其运行优化[J]. 电网技术,2012,36(8):12-18.
YUAN Yue,CAO Yang,FU Zhixin,et al. Assessment on energy-saving and emission reduction benefit of microgrid and its operation optimization[J]. Power System Technology,2012,36(8):12-18.

[3] ROCABERT J,LUNA A,BLAABJERG F,et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(11):4734-4749.

[4] 姜世公,王卫,刘桂花,等. 微网孤岛运行条件下基于导纳域的稳定性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):19-25.
JIANG Shigong,WANG Wei,LIU Guihua,et al. Admittance specification stability of islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):19-25.

[5] 柳明,柳文. 基于电压的自治微电网分布式协调控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):20-24.
LIU Ming,LIU Wen. Voltage based distributed control of autonomous microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(1):20-24.

[6] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012, 32(5):19-23.

[7] HE Jinwei,LI Yunwei,MUNIR M S. A flexible harmonic control approach through voltage-controlled DG-grid interfacing converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59 (1):444-455.

[8] SAVAGHEBI M,GUERRERO J M,JALILIAN A,et al. Mitigation of voltage and current harmonics in grid-connected microgrids[C]// 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Hangzhou,China:[s.n.],2012:1610-1615.

[9] HE Jinwei,LI Yunwei. Analysis,design,and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2011,47(6):2525-2538.

[10] 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.

[11] VASQUEZ J C,GUERRERO J M,MIRET J,et al. Hierarchical control of intelligent microgrids[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2010,4(4):23-29.

[12] 关雅娟,邬伟扬,郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报,2011,31(33):52-60.
GUAN Yajuan,WU Weiyang,GUO Xiaoqiang. Control strategy for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(33):52-60.

[13] 谢玲玲,时斌,华国玉,等. 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. 电网技术,2013,37(4):992-998.
XIE Lingling,SHI Bin,HUA Guoyu,et al. Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control[J]. Power System Technology,2013,37(4):992-998.

[14] VASQUEZ J C,GUERRERO J M,SAVAGHEBI M,et al. Modeling,analysis,and design of stationary reference frame droop controlled parallel three-phase voltage source inverters[C]// 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, South Korea:[s.n.],2011:272-279.

[15] 中国电力科学研究院. Q/GDW480—2010 分布式电源接入电网技术规定[S]. 北京:国家电网公司,2010.

[16] GUO Xiaoqiang,WU Weiyang,CHEN Zhe. Multiple complex coeficient filter based phase locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,58(4):1194-1204.

[17] 杭丽君,李宾,黄龙,等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振PR电流控制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(12):51-58.
HANG Lijun,LI Bin,HUANG Long,et al. A multi-resonant PR current controller for grid-connected inverters in renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(12):51-58.

[18] TEODORESCU R,BLAABJERG F,LISERRE M,et al. Proportional resonant controllers and filters for grid-connected voltage source converters[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications,2006,153(5):750-762.

作者简介:

梁建钢

梁建钢(1985-),男,山西太原人,博士研究生,从事微电网变流器控制技术方面的研究(**E-mail**:11117372@bjtu.edu.cn);

金新民(1950-),男,北京人,教授,博士研究生导师,从事电力电子、交流传动、新能源发电、智能配电网等方面的研究;

吴学智(1975-),男,山西大同人,讲师,博士,从事新能源并网技术、微电网变流器及微电网系统、大功率电机控制技术等方面的研究;

童亦斌(1969-),男,湖南株洲人,副教授,硕士,从事大功率变流器、智能微电网技术和IGCT集成门极驱动技术等方面的研究。

基于开绕组电机的双三电平逆变器容错控制方法

吴 迪,伍小杰,苏良成,戴 鹏
(中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008)

摘要:针对双逆变器供电拓扑在提高变频器输出电压和输出电平数的同时具有良好的容错性能这一特性,提出了一种基于参考电压矢量解耦的五电平 SVPWM 容错算法。该方法在简化算法的同时满足了系统容错控制要求;直接利用解耦后的三相给定相电压计算出相应的切换时刻,省略了复杂的扇区判断和查表;利用最优空间矢量位置原理对平衡控制因子进行修正,在精确控制中点电位平衡的同时,降低电压电流谐波。仿真及实验结果表明,该方法能够有效应用于故障情况,缩短程序运行时间,改善输出电流谐波特性。

关键词:逆变器;容错控制;简化算法;中点电位平衡
中图分类号:TM 464 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.012

0 引言

高压大功率变换器以其优越的性能和良好的节能效果,在工业生产、交通运输等领域得到了迅速的推广和应用[1-4]。近年来,开关器件的耐压等级严重制约着高压变频技术的发展。为了在现有开关器件耐压等级基础上得到更高的输出电压,有学者提出一种基于开绕组电机的双逆变器供电拓扑。该拓扑将异步电动机定子绕组打开,绕组两端由 2 台逆变器同时供电[5-6]。

根据母线结构的不同,双逆变器供电拓扑可分为共母线结构和独立母线结构[6]。相较于共母线结构,独立母线结构多出一套整流设备,成本较高,控制更为复杂,但是由于其整流部分相互隔离,可以有效解决双逆变器拓扑固有的零序环流问题[6-10],从而避免了共母线结构中抑制或消除零序环流时造成电压利用率降低的问题。

相较于单端供电系统,双逆变器供电系统输出电压高,可以提供更多的相电压电平数,而且不存在传统串联开关器件方式提高输出电压所带来的均压问题,与单逆变器系统相比电机端等效开关频率加倍[6-13]。如果两端都采用三电平逆变器,则可使用耐压等级 4.5 kV 的开关器件实现逆变器额定输出电压 6 kV,输出最高可达到 17 电平;直流母线电压 ±2.5 kV,电压突跳幅值 $U_{dc}/2 \leqslant 2.5$ kV,与 3 kV 电压等级的三电平变频器相同。双逆变器拓扑的另一个重要特点是容错性能好[14-15],如果其中一个开关器件或逆变器出现故障,系统仍然可以在降低一半输出功率的情况下稳定运行。

双逆变器拓扑的容错控制方法应该能够同时适用于双逆变器供电状态和单逆变器供电状态。但是双逆变器 SVPWM 算法多采用整体控制[7-13],这类方法以电机端合成后的空间电压矢量作为对象

收稿日期:2013-11-06;**修回日期**:2014-03-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377160)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377160)

Improved grid-connection operation of microgrid converter based on droop control

LIANG Jiangang,JIN Xinmin,WU Xuezhi,TONG Yibin
(National Active Distribution Network Technology Research Center,Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China)

Abstract: When the grid-connection operation of microgrid converter is based on traditional droop control, its output current will be distorted by the harmonic components of grid voltage. The output current harmonics of microgrid converter based on traditional method are analyzed and it is proposed to simply improve its voltage control loop to effectively suppress the output current harmonics. The voltage regulators are regrouped to augment the output harmonic impedance of microgrid converter without affecting the fundamental impedance. The relationships between resonant coefficient and suppression effect and between cut-off frequency and suppression bandwidth are analyzed. Simulative and experimental results show that,the output harmonic current of microgrid converter is lowered to 15%,verifying the feasibility and correctness of the proposed improvement.

Key words: microgrid; electric converters; droop control; voltage regulator; current regulator; voltage control; harmonic analysis