

# 增强变流器对感性电网适应能力的虚拟阻抗控制

王月, 谢冬冬

(商丘学院 机械与电气信息学院, 河南 商丘 476113)

**摘要:**弱电网条件下的感性电网阻抗会严重威胁到并网变流器的稳定运行。首先建立了弱电网下并网变流器的数学模型,采用根轨迹和小增益定理对电网阻抗中感性和阻性成分对系统稳定性的影响进行了分析。进一步,针对变流器对感性电网阻抗适应能力较低的问题,为了增大感性电网条件下系统的阻尼,引入了虚拟电网电阻控制策略。理论和仿真结果表明,虚拟电网电阻控制策略可显著提高变流器对感性电网的适应能力。

**关键词:**弱电网;稳定性;根轨迹;小增益定理;虚拟电网电阻

**中图分类号:**TM461 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19570

## Virtual Impedance Control for Improving the Inductive Grid Adaptability of the Converter

WANG Yue, XIE Dongdong

(Mechanical & Electrical Information College, Shangqiu University, Shangqiu 476113, Henan, China)

**Abstract:** In the weak grid, the inductive grid impedance will seriously threaten the stable operation of the grid-connected converter. First, the mathematical model of grid-connected converter in the weak grid was built, and the influence of the inductive and the resistive component in the grid impedance on the system stability was analyzed using the root locus and the small gain theorem. Further, for the low inductive grid impedance adaptability of the converter, the virtual grid equivalent resistance control strategy was introduced to improve the damping of the system in inductive grid impedance. Theoretical analysis and simulation results show that the virtual grid equivalent resistance control strategy can significantly enhance the inductive grid impedance adaptability of the converter.

**Key words:** weak grid; stability; root locus; small gain theorem; virtual grid resistance

并网型变流器在新能源发电和电能质量治理等领域得到广泛应用,然而研究表明,在弱电网或者感性电网阻抗成分较大的条件下,并网变流器的稳定性将下降,甚至失稳,导致并网电流出现震荡。为此,新能源并网标准要求变流器在短路比(short current ratio, SCR)大于10的工况下能够稳定运行<sup>[1]</sup>。因此,研究提高变流器的感性电网适应能力具有十分重要的实际意义。

目前关于如何提高变流器对感性电网适应能力方面的研究主要可分为2类:1)通过对现有控制策略下控制参数的优化设计来提高变流器的感性电网适应能力;2)专注于控制策略的改进。

文献[2]通过对电容电流反馈系数进行优化设计来提高变流器的感性电网适应能力,但是该方法仅限于LCL型并网逆变器,并且当最优参数

下变流器的感性电网适应能力不满足要求时该方法无能为力。文献[3]采用虚拟阻抗法对变流器的输出阻抗进行调节,从而提高变流器对弱电网的适应能力,由于在参数设计过程中需考虑变流器输出阻抗在不同频段下的特性,因此参数设计十分复杂。文献[4]通过在并网点并联RC支路实现对电网阻抗的调节,使得调节后的等效电网阻抗满足系统稳定性约束,保证了电网阻抗宽范围变化时并网变流器的稳定性,但是该方法属于无源校正,接入的RC支路会消耗一定的无功功率,同时引入有功损耗。

针对感性电网条件下变流器的稳定性问题,本文首先建立了弱电网下变流器的数学模型,采用根轨迹和最小增益定理分析了电网等值电阻和电感对系统稳定性的影响,考虑到电网等值电

阻可为系统提供一定的阻尼,因此,为了提高变流器对感性电网的适应能力,引入了虚拟电网电阻控制策略。最后,搭建了系统仿真模型,仿真结果证明了所提控制策略的有效性。

### 1 弱电网下并网变流器的数学模型

图1为弱电网下并网变流器的主电路结构及其控制框图。

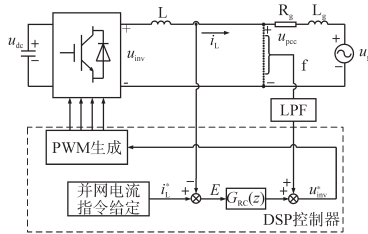


图1 弱电网下并网变流器及其控制框图  
Fig.1 Grid-connected converter and its control structure in weak grid

图1中,  $u_{dc}$  为直流侧电压, 可通过对并网电流中有功分量的调节来维持其平均值恒定;  $u_{inv}$  为变流器交流侧输出电压;  $L$  为并网滤波电感;  $i_L$  为变流器输出电流;  $L_g$  和  $R_g$  分别为弱电网的等值电感与等值电阻;  $u_g$  为电网电压;  $u_{pcc}$  为并网点电压;  $f$  为电网电压前馈支路; LPF 为电网电压采样低通滤波器。值得注意的是, 电流控制器对整个装置的性能有着重要影响, 其直接决定了系统的动态性能和稳态并网电流质量。基于内模原理的重复控制器 (repetitive controller, RC) 对周期性扰动具有较强的抑制能力, 近年来在变流器控制中应用广泛<sup>[5]</sup>, 此处电流控制器采用 RC, 其离散域描述如图中  $G_{RC}(z)$  所示。

根据图1可知并网点电压和电网电压之间的关系为

$$u_{pcc}(s) = (L_g s + R_g) i_L(s) + u_g(s) \quad (1)$$

可见, 由于电网阻抗的存在,  $u_{pcc}$  不仅由电网电压决定, 同时也受输出电流  $i_L$  的影响。根据图1中各变量间的关系可得弱电网下变流器输出电流控制框图如图2所示。

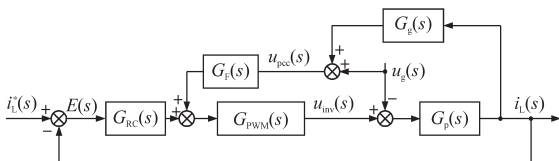


图2 弱电网下并网变流器输出电流控制框图  
Fig.2 Control block diagram of the converter's output current in weak grid

图2中,  $G_g(s)$  为电网阻抗的  $s$  域描述;  $G_F(s)$  为电网电压采样二阶低通滤波器;  $G_p(s)$  为考虑电网阻抗后的等效被控对象;  $G_{PWM}(s)$  为数字控制和 PWM 调制引入的延时, 通常取 1.5 个开关周期<sup>[6]</sup>, 相应环节的传递函数如下:

$$G_g(s) = L_g s + R_g \quad (2)$$

$$G_F(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c^2} s^2 + \frac{1}{Q\omega_c} s + 1} \quad (3)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{(L_g + L)s + R_g} \quad (4)$$

$$G_{PWM}(s) = e^{-1.5T_s s} \approx \frac{1}{1 + 1.5T_s s} \quad (5)$$

式中:  $\omega_c$  和  $Q$  分别为二阶低通滤波器的截止频率和品质因数;  $T_s$  为控制周期。RC 控制器本质上属于延时控制, 因此, 为了保证系统的响应速度, 需与比例控制器并联使用, 比例+RC 控制器的结构如图3所示<sup>[7]</sup>。

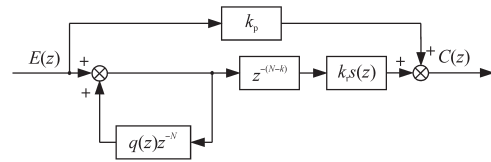


图3 比例+RC 控制器结构  
Fig.3 Structure of proportional and repetitive controller

根据图3可得比例+RC 控制器的  $z$  域传递函数为

$$G_{RC}(z) = k_p + \frac{k_r s(z) z^{-(N-k)}}{1 - q(z) z^{-N}} \quad (6)$$

式中:  $k_p$  为比例系数;  $k_r$  为谐振系数;  $N$  为控制系统在一个工频周期内的采样点数;  $k$  为超前校正步长, 用来补偿数字控制和被控对象引入的相位滞后;  $s(z)$  为滤除 RC 中高频分量而设置的二阶低通滤波器;  $q(z)$  为接近于 1 的常数。

为了简化表达式, 首先定义:

$$D(s) = 1 - G_F(s) G_{PWM}(s) \quad (7)$$

$$G_L(s) = 1 / (L_g) \quad (8)$$

则根据式(6)和图2可得如下关系:

$$\frac{E(z)}{i_L^*(z) [1 + G_L(z) G_g(z) D(z)] + G_L(z) D(z) u_g(z)} = \frac{1}{1 + k_p G_{PWM}(z) G_L(z) + G_L(z) G_g(z) D(z)} \cdot \frac{1}{1 - z^{-N} R(z)} \quad (9)$$

其中

$$R(z) = \frac{q(z) - \frac{k_r s(z) z^4 G_{PWM}(z) G_L(z)}{1 + k_p G_{PWM}(z) G_L(z) + G_L(z) G_g(z) D(z)}}{1 + k_p G_{PWM}(z) G_L(z) + G_L(z) G_g(z) D(z)} \quad (10)$$

下文将根据式(9)对变流器的弱电网适应能力进行分析。

## 2 电网等值电感和等值电阻对系统稳定性的影响

根据式(9)可得并网变流器控制系统的误差传递关系如图4所示。

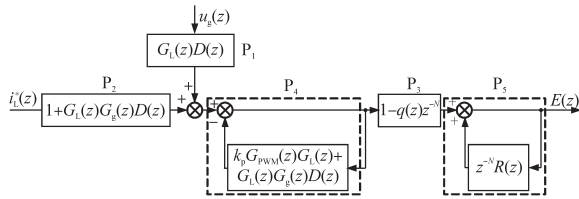


图4 控制系统的误差传递关系

Fig.4 Error transitive relation of the control system

图4表明,系统的误差传递关系分为5部分,根据式(7)、式(8)和式(2)可知,随着电网阻抗的变化,  $P_1$  和  $P_2$  不会含有单位圆外的极点,由于  $P_3$  中  $q(z)$  为接近于1的常数,其与延时环节  $z^{-N}$  串联后也不会引入单位圆外的极点,因此当电网阻抗变化时只有  $P_4$  和  $P_5$  可能出现单位圆外的极点,即导致系统不稳定。观察  $P_4$  和  $P_5$  可知,  $P_4$  为一典型的负反馈环节且阶数较低,因此可采用根轨迹法研究其稳定性,而  $P_5$  为一含有  $z^{-N}$  项的正反馈环节,阶数较高,这给根轨迹法的使用带来很大困难,因此,为了研究  $P_5$  的稳定性,此处采用最小增益定理给出的使得  $P_5$  稳定的一个充分非必要条件:在  $1/2$  的采样频率范围内,式(10)的模均小于  $1^{[8]}$ ,即

$$|R(z)| < 1 \quad (11)$$

综上,若使得弱电网下并网变流器稳定,则需要  $P_4$  的所有极点位于单位圆内,同时在  $0 \sim 1/2$  的采样频率范围内  $P_5$  的 Nyquist 曲线始终位于单位圆内。

### 2.1 电网等值电感对系统稳定性的影响

并网变流器额定参数为:电网电压  $U_g=220$  V, 额定电流  $I_g=100$  A, 采样频率  $f_s=10$  kHz, 滤波电感  $L=0.2$  mH。

为了具体分析并网变流器的感性电网适应能力,首先根据以上参数和文献[7]中的参数设计方法,选择 RC 中二阶滤波器  $s(z)$  与电网电压采样滤波器  $G_f(s)$  的截止频率为 2 kHz, 品质因数为

0.707,  $q(z)=0.97$ ,  $k_r=0.8$ ,  $k=4$ , 根据并网变流器额定参数,选择  $k_p=1.2$ , 此时系统的开环穿越频率约为 1 kHz, 即开关频率的  $1/10$ 。在 10 kHz 采样频率下一个工频周期的采样点数  $N=200$ 。

根据上述参数,令电网等值电阻  $R_g=0$ , 可得  $P_4$  以电网等值电感  $L_g$  为参数时的特征方程如下式所示:

$$\begin{cases} a_1 z^4 + a_2 z^3 + a_3 z^2 + a_4 z + a_5 = 0 \\ a_1 = -46\ 682 L_g - 8.48 \\ a_2 = 84\ 305.02 L_g + 13.16 \\ a_3 = -38\ 364.98 L_g - 10.98 \\ a_4 = 10\ 542.88 L_g + 4.31 \\ a_5 = -9\ 800.93 L_g - 1 \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12)和式(10)可得  $L_g$  变化时  $P_4$  的闭环根轨迹和  $R(z)$  的 Nyquist 曲线如图5所示。

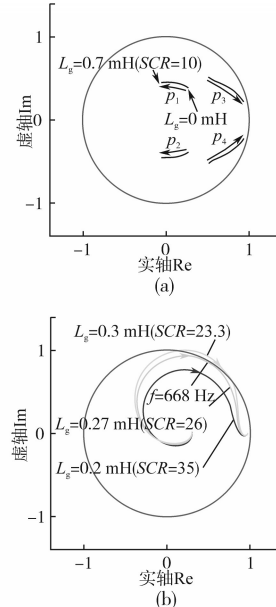


图5 电网等值电感对系统稳定性的影响

Fig.5 Influence of the equivalent grid inductance on the system stability

由图5可知,在  $L_g$  由 0 mH 增大至 0.7 mH, ( $L_g=0.7$  mH 时对应的短路比  $SCR=10$ ) 的过程中,  $P_4$  的极点始终位于单位圆内(见图5a),即  $P_4$  是稳定的。然而,随着  $L_g$  的增大,  $R(z)$  的 Nyquist 曲线迅速向单位圆移动,当  $L_g=0.27$  mH ( $SCR=26$ ) 时, Nyquist 曲线到达单位圆(见图5b),若  $L_g$  继续增大, Nyquist 曲线将超越单位圆,系统进入不稳定状态。此外,  $L_g=0.27$  mH 时, Nyquist 曲线在 668 Hz 处到达单位圆边界,说明系统进入不稳定状态时输出电流的震荡频率位于 668 Hz 附近。可见,  $L_g$  的增大将导致系统稳定性的降低,系统所能适

应的最小SCR为26,这不满足文献[1]标准中要求的系统在SCR为10时仍能稳定运行的规定。

### 2.2 电网等值电阻对系统稳定性的影响

为了分析电网等值电阻对系统稳定性的影响,令 $L_g=0.7\text{ mH}$ ,即 $SCR=10$ ,此时 $P_4$ 以 $R_g$ 为参数时的特征方程如下式所示:

$$\begin{cases} a_1 z^4 + a_2 z^3 + a_3 z^2 + a_4 z + a_5 = 0 \\ a_1 = -0.297R_g - 5.24 \\ a_2 = -0.0576R_g + 9.18 \\ a_3 = 0.235R_g - 4.81 \\ a_4 = 0.0576R_g + 1.487 \\ a_5 = 0.0623R_g - 1 \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)和式(10)可得 $R_g$ 变化时 $P_4$ 的闭环根轨迹和 $R(z)$ 的Nyquist曲线如图6所示。

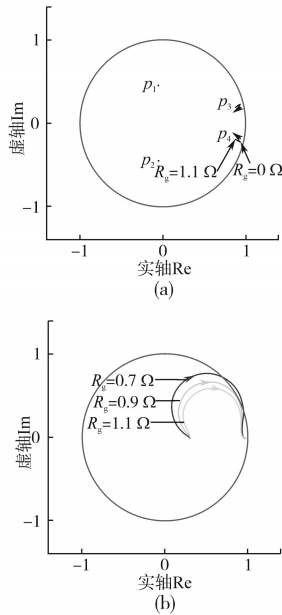


图6 电网等值电阻对系统稳定性的影响  
Fig.6 Influence of the equivalent grid resistance on the system stability

由图6a可知,在 $R_g$ 由 $0\ \Omega$ 增大至 $1.1\ \Omega$ 的过程中, $P_4$ 的极点始终位于单位圆内,即 $P_4$ 是稳定的。值得注意的是,随着 $R_g$ 的增大,Nyquist曲线逐渐向单位圆内移动,当 $R_g$ 增大至 $0.9\ \Omega$ 时,Nyquist曲线完全落入单位圆内(见图6b),系统由不稳定状态进入稳定状态。可见, $R_g$ 的增大可为系统提供一定的阻尼,有利于系统稳定性的提高。

### 3 虚拟电网等值电阻控制策略

由2.2节的分析可知,增大 $R_g$ 有利于提高变流器对感性电网的适应能力,但是,实际中 $R_g$ 属于

不可控变量,因此只能采用虚拟 $R_g$ 的控制策略。

图7为虚拟电网等值电阻控制策略原理图。为了导出虚拟 $R_g$ 控制策略的具体实现方法,首先假定电网存在等值电阻 $R_g$ ,根据图2和式(4)可得输出电流控制框图如图7a所示,再根据式(2)、式(4)和式(8)可将图7a等效变换为图7b,然后提取图7b中含有 $R_g$ 项的支路,可将图7b等效变换为图7c。可见,若要使得虚拟电网等值电阻为 $R_g$ ,只需在原有控制下加入图7c中虚线框内的算法即可。即:实现虚拟电网等值电阻值为 $R_g$ 的控制时,只需将输出电流分别乘以 $G_F(s)R_g$ 和 $R_g/G_{PWM}(s)$ ,然后将两者之差叠加至电流调节器输出端。

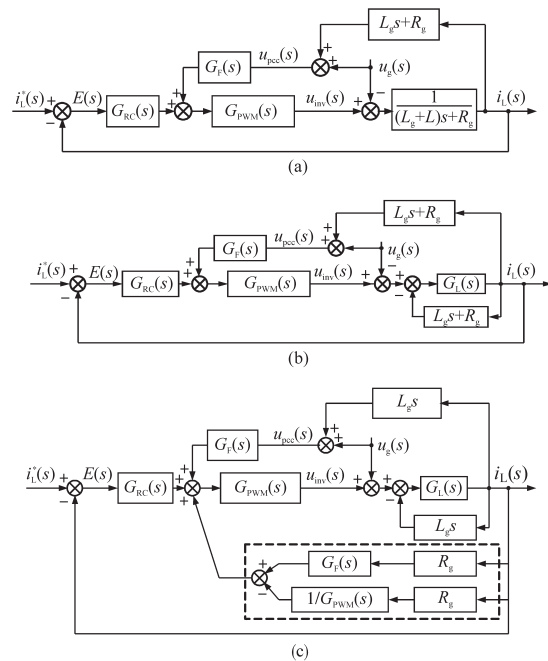


图7 虚拟电网等值电阻控制策略原理  
Fig.7 Principle of the control strategy for virtual grid equivalent resistance

当虚拟等值电阻 $R_g$ 取不同值时并网变流器所能适应的最小短路比如图8所示。

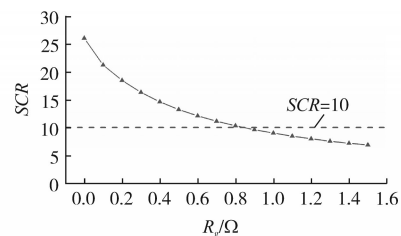


图8 不同虚拟电网等值电阻下变流器所能适应的最小短路比  
Fig.8 The minimum SCR that the converter can adapt under different virtual grid equivalent resistances

由图8可知,通过虚拟等值电阻 $R_g$ 可显著提

高变流器的感性电网阻抗适应能力,当虚拟 $R_g$ 为 $0.9 \Omega$ 时变流器能够适应的最小SCR为10,满足文献[1]标准中的规定。

### 4 仿真验证

为了验证文中理论分析的正确性和虚拟电网等值电阻控制策略的有效性,搭建了弱电网下并网变流器的仿真模型,并网变流器的主电路参数如2.1节所示。控制参数设置为:比例系数 $k_p=1.2$ ;重复控制器参数 $q(z)=0.97, k_r=0.8, k=4$ ;重复控制器中的二阶低通滤波器 $s(z)$ 与电网电压采样滤波器 $G_F(s)$ 的截止频率均为2 kHz,品质因数均为0.707。

未采用虚拟 $R_g$ 控制策略时的仿真结果如图9所示,图9a和图9b分别为 $L_g$ 取0.26 mH和0.28 mH时的输出电流仿真结果,可见,当 $L_g$ 为0.26 mH时变流器输出电流正常,输出电流THD为3.4%。系统稳定,当 $L_g$ 增大至0.28 mH时输出电流出现大幅震荡,输出电流THD约为16%,系统呈现出不稳定状态,这与2.1节中给出的此时变流器所能适应的最大 $L_g$ 为0.27 mH一致。图9c表明,当 $L_g=0.28$  mH系统进入不稳定状态后输出电流的震荡频率主要以650 Hz和700 Hz为主,这与2.1节中给出的输出电流震荡频率位于668 Hz附近基本一致。

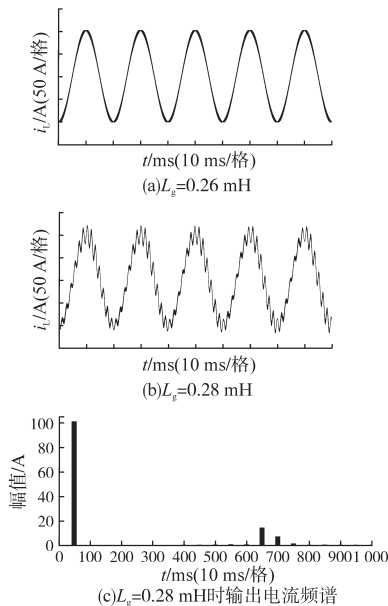


图9 未采用虚拟电网等值电阻控制策略时仿真结果  
Fig.9 Simulation results without the virtual grid equivalent resistance control

在相同的控制参数下,引入虚拟等值电阻 $R_g$ 控制策略后的仿真结果如图10所示。

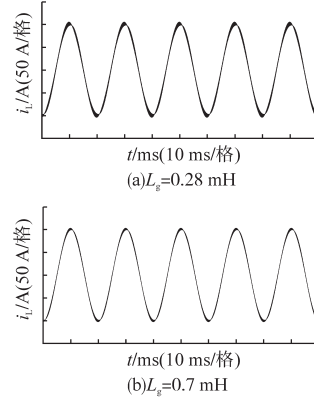


图10 采用虚拟电网等值电阻控制策略时仿真结果  
Fig.10 Simulation results with the virtual grid equivalent resistance control

由图10可知,引入虚拟等值电阻 $R_g$ 控制策略后无论 $L_g$ 为0.28 mH还是0.7 mH,变流器输出电流均正常,输出电流THD分别为3.2%和1.65%,与 $L_g=0.28$  mH时相比, $L_g=0.7$  mH时输出电流的THD变小,这主要是由于电网等值电感对高频开关纹波电流具有抑制能力,因此 $L_g$ 较大时输出电流中的纹波电流含量降低。

为了进一步验证文中所提控制策略的有效性,改变输出滤波电感和输出电流的大小,取 $L=0.4$  mH,输出电流幅值为50 A(文中称之为工况2)时进行了仿真,结果如图11和图12所示。

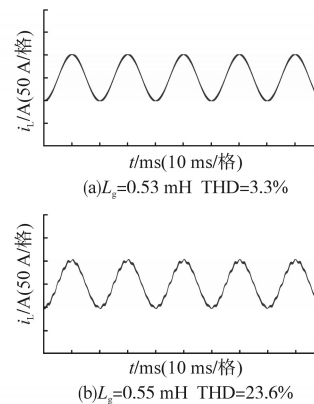


图11 工况2下未采用虚拟电网等值电阻控制策略时仿真结果  
Fig.11 Simulation results without the virtual grid equivalent resistance control under working condition two

图11、图12表明,引入虚拟 $R_g$ 控制前,在 $L_g=0.53$  mH时变流器输出电流正常,输出电流THD为3.3%,系统处于稳定状态,当 $L_g$ 增大至0.55 mH

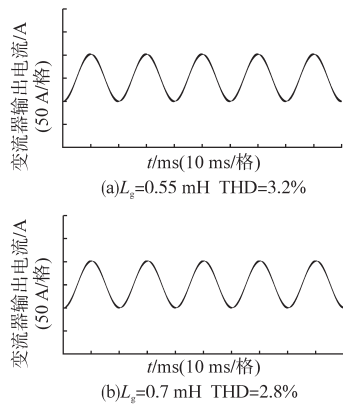


图12 工况2下采用虚拟电网等值电阻控制策略时仿真结果  
Fig.12 Simulation results with the virtual grid equivalent resistance control strategy under working condition two

时输出电流出现震荡,输出电流 THD 为 23.6%,系统进入不稳定状态,此时变流器所能适应的最大  $L_g$  为 0.53 mH。图 12 表明,引入虚拟  $R_g$  控制后无论在  $L_g=0.55$  mH 还是  $L_g=0.7$  mH 时变流器输出电流均正常,输出电流 THD 分别为 3.2% 和 2.8%,变流器能够在  $SCR=10$  下稳定运行,THD 减小的原因仍是  $L_g$  增大后其滤波作用增强。

上述 2 种工况下的仿真结果表明,引入虚拟电网等值电阻控制策略后可显著提高并网变流器对感性电网的适应能力,验证了虚拟电网等值电阻控制策略的有效性。

## 5 结论

针对感性电网下并网变流器的稳定性问题,本文首先建立了弱电网下并网变流器的数学模型,基于此,采用根轨迹和最小增益定理详细分析了电网等值电感和等值电阻对系统稳定性的影响。结果表明电网等值电感的增大将导致系统稳定性降低,而电网等值电阻的增大有利于提

高系统的稳定性。

为了提高变流器对感性电网的适应能力,引入了虚拟电网等值电阻控制策略,并通过控制框图等效变换给出了虚拟电网等值电阻控制策略的具体实现方法。结果表明,引入虚拟电网等值电阻控制策略可显著增强变流器对感性电网的适应能力。

## 参考文献

- [1] 国家电网公司. Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [2] Pan D, Ruan X, Bao C, *et al.* Optimized Controller Design for LCL-type Grid-connected Inverter to Achieve High Robustness Against Grid-impedance Variation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1537-1547.
- [3] 杨东升,阮新波,吴恒,等. 提高 LCL 型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.
- [4] 滕宇,王学华,余辉,等. 提高 LCL 型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的阻抗调节方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(Z): 197-204.
- [5] 薛彪,袁斌华,苏礼,等. 基于比例重复的 T 型三电平并网变换器控制研究[J]. 电气传动, 2018, 48(1): 28-31.
- [6] Freijedo F, Vidal A, Yepes A G, *et al.* Tuning of Synchronous-frame PI Current Controllers in Grid-connected Converters Operating at a Low Sampling Rate by MIMO Root Locus [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5006-5016.
- [7] Jiang S, Cao D, Li Y, *et al.* Grid-connected Boost-half-bridge Photovoltaic Micro-inverter System Using Repetitive Current Control and Maximum Power Point Tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4711-4722.
- [8] 王禹玺,刘秦维,刘伟,等. 一种加权式并联型重复控制的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 127-134.

收稿日期:2018-10-07  
修改稿日期:2018-12-14