

采用LCL滤波器并网逆变器状态反馈 有源阻尼控制研究

雷鹏娟¹, 赵清林², 韩彦龙¹, 张海夺³

(1. 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 承德 067000; 2. 燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004;
3. 国网吉林省电力有限公司物资公司, 长春 130000)

摘 要: 针对三相并网逆变器系统中LCL滤波器的谐振问题, 建立采用LCL滤波器三相并网逆变器系统的数学模型, 分析LCL滤波器参数变化对高频开关纹波衰减和谐振频率的影响。设计滤波器参数并在此基础上提出一种新的状态反馈有源阻尼控制方法——通过状态反馈将被控对象的极点配置在一定范围内, 再结合系统的稳态性和动态性设计PI调节器参数。最后借助MATLAB软件完成控制方案的仿真, 并搭建系统实验平台验证该控制策略的有效性和正确性。

关键词: LCL滤波器; 并网逆变器; 状态反馈; 有源阻尼

中图分类号: TM464

文献标识码: A

0 引 言

随着近年来光伏发电容量的增大, 其容量除就近供电外^[1-3]剩余部分则并入电网, 并网功率的不断增大使得单电感L滤波器的体积随之增大^[4], 这不仅影响到系统的动态性能, 而且同时带来成本的增加。文献[5]中提出在大功率并网逆变器中采用LCL滤波器, 与传统的单电感L滤波器相比, LCL滤波器可减小滤波器的体积, 对系统动态性能的改善也有显著作用。因LCL滤波器在谐振频率处有很大的相位滞后, 所以给其控制器的设计带来一定困难^[6]。文献[7]中对理想的无阻尼LCL滤波器进行分析, 结果显示在谐振角频率处的幅值增益为无穷大的同时相位也发生很大跳变, 且相频特性穿越 -180° 使得系统变得不稳定。若只通过控制器的调节作用使系统保持稳定, 则不仅会影响系统的动态性能, 还会减小闭环系统的带宽。故文献中提出在控制系统中加入阻尼部分。目前针对有源阻尼和无源阻尼方法许多学者也进行了深入的对比研究。

本文首先建立采用LCL滤波器的三相并网逆变器数学模型, 接着分析滤波器各参数变化对谐振频率和高频开关纹波衰减的影响, 并设计其参数。针对LCL滤波器的谐振问题, 本文研究了状态反馈有源阻尼控制方法, 并对所提出的全状态反馈有源阻尼方案使用MATLAB仿真软件进行验证。最后搭建采用LCL滤波器的三相并网逆变器系统实验平台, 验证全状态反馈有源阻尼控制策略的有效性。

1 基于LCL三相并网逆变器系统建模分析

1.1 基于LCL三相并网逆变器系统建模

图1给出了采用LCL滤波器的三相并网逆变器主电路图。其中, R_1 、 R_2 分别为滤波电感 L_1 、 L_2 的等效电阻, $u_a \sim u_c$ 为逆变器三相输出到电网中性点的电压, $i_{ca} \sim i_{cc}$ 为滤波电容上的电流, $u_{ca} \sim u_{cc}$ 为滤波电容上的电压, U_{dc} 为直流母线电压, $i_a \sim i_c$ 为逆变器侧电流, $i_{ga} \sim i_{gc}$ 为三相入网电流, $e_a \sim e_c$ 为三相电

网电压。利用坐标变换可得到在 dq 坐标系下 LCL 滤波器的模型框图如图 2 所示, 其中 u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 为逆变器的输出电压和电流, e_d 、 e_q 、 i_{gd} 、 i_{gq} 为电网电压和入网电流, u_{cd} 、 u_{cq} 、 i_{cd} 、 i_{cq} 为滤波电容上的电压和电流, ω 为电网角频率。

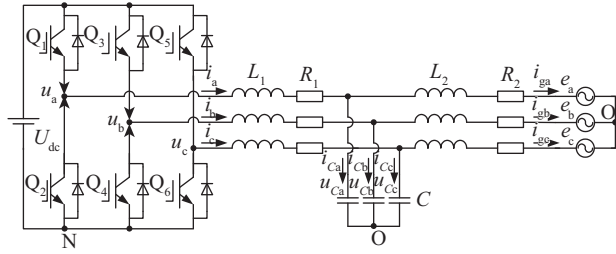


图1 LCL三相并网逆变器主电路图

Fig. 1 Main circuit diagram of LCL three-phase grid inverter

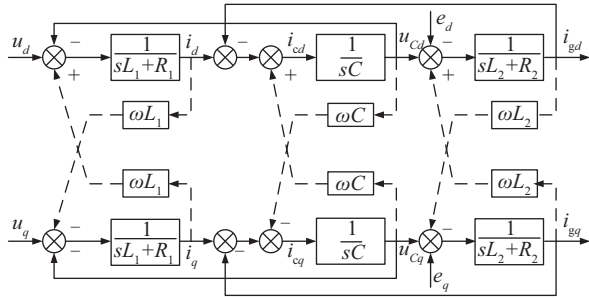


图2 LCL滤波器模型框图

Fig. 2 LCL filter model diagram

为实现数字控制, 建立 LCL 滤波器的离散模型, 得到的考虑延时后系统的离散状态空间表达式为:

$$\begin{cases} x'(k+1) = G'x'(k) + H'u(k) \\ y(k) = C'x'(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中, k —— 第 k 个采用周期; $G = e^{AT}$; $H = \left(\int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) \cdot B$; $G' = \begin{bmatrix} G_{6 \times 6} & H_{6 \times 4} \\ 0_{4 \times 6} & 0_{4 \times 4} \end{bmatrix}$; $H' = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 4} \\ I_{4 \times 4} \end{bmatrix}$; $C' = [C_{2 \times 6} \quad 0_{2 \times 4}]$ 。

1.2 LCL滤波器参数变化的影响及参数选择

1) 对谐振频率的影响

基于谐振频率对控制器参数和高频纹波衰减的影响, 本文分析了 LCL 滤波器参数变化对谐振频率的影响。

LCL 滤波器电路的谐振角频率表达式为:

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{1}{a(1-a)LC}} \quad (2)$$

式中, $L = L_1 + L_2$, $a = L_1/L$, 由式(2)得到如图 3 所示

总电感 L 和比值 a 变化对谐振频率影响的三维坐标图。从图 3 中可看出谐振角频率随着 L 的增大而减小, 而且当 $a=0.5$ 时, 谐振角频率最小。

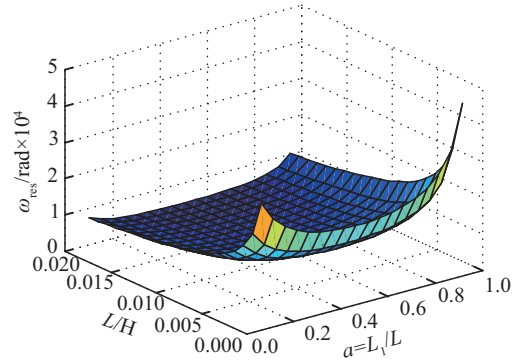


图3 总电感 L 、比值 a 与谐振角频率的三维坐标图

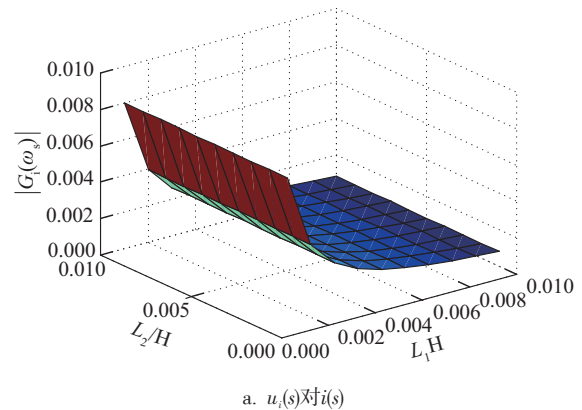
Fig. 3 3D coordinate diagram of total inductance L , ratio a and resonant angular frequency

2) 对开关纹波衰减的影响

本文分析了 LCL 滤波器参数变化对高频纹波衰减的影响。表达式(3)和式(4)分别为逆变器输出电压 $u_i(s)$ 对逆变器侧电流 $i(s)$ 与入网电流 $i_g(s)$ 的传递函数。根据表达式分别得到 2 种情况下滤波电感 L_1 、 L_2 与幅值增益 $|G_i(j\omega_s)|$ 及总电感 L 一定的情况下滤波电容 C 、比值 a 与幅值增益 $|G_i(j\omega_s)|$ 的三维坐标图, 如图 4 和图 5 所示。

$$\begin{aligned} G_i(s) &= \frac{i(s)}{u_i(s)} = \frac{L_2Cs^2 + 1}{s(L_1L_2Cs^2 + L_1 + L_2)} \\ &= \frac{(1-a)LCs^2 + 1}{a(1-a)L^2Cs^3 + Ls} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} G_{ig}(s) &= \frac{i_g(s)}{u_i(s)} = \frac{1}{L_1L_2Cs^3 + (L_1 + L_2)s} \\ &= \frac{1}{a(1-a)L^2Cs^3 + Ls} \end{aligned} \quad (4)$$



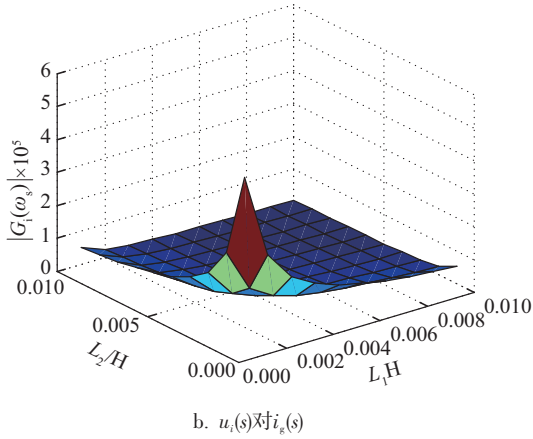


图4 电感 L_1 、 L_2 与幅值增益 $|G_i(j\omega s)|$ 的三维坐标图
Fig. 4 3D coordinate diagram of inductance L_1 , L_2 and amplitude gain

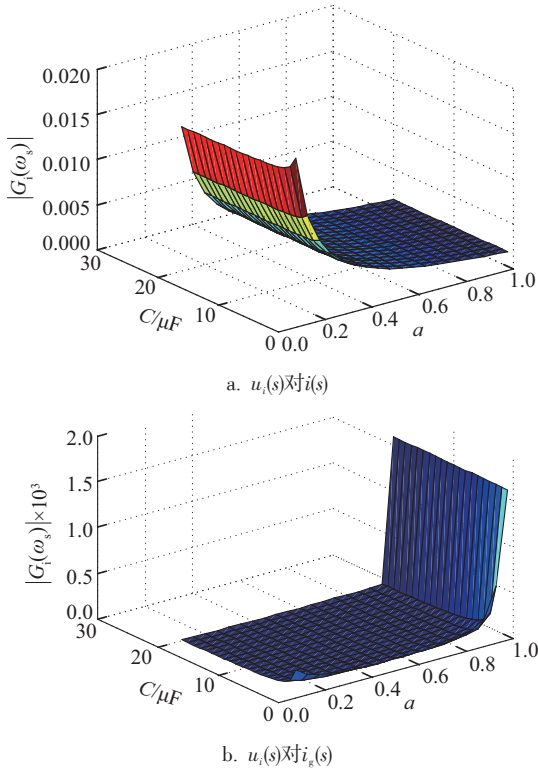


图5 电容 C 、电感比值 a 与幅值增益 $G_i(j\omega s)$ 的三维坐标图
Fig. 5 3D coordinate diagram of capacitance C , inductance ratio a and amplitude gain

3) 滤波器参数的选择

通过对图3~图5坐标图进行分析,在设计滤波器参数时,选择滤波电感 $L_1 > L_2$,电感比值 $a < 0.9$ 。结合本文中设计的系统参数(如表1所示)最终选择逆变器侧电感 $L_1 = 4 \text{ mH}$,网侧滤波电感 $L_2 = 1 \text{ mH}$,滤波电容 $C = 5 \text{ } \mu\text{F}$ 。

表1 拟设计系统参数

Table 1 System parameters of proposed designed

U_{dc}/V	P/kW	f_s/kHz	E/V	PF	$THD/\%$
700	5	10	220	>0.98	<5

注: U_{dc} —输入电压; P_o —输出功率; f_s —开关频率; E —电网相电压; PF —功率因数; THD —并网电流总谐波畸变率。

2 采用LCL三相并网逆变器系统控制策略研究

本文闭环控制使用并网电流反馈控制,采用全状态反馈实现有源阻尼,具体方法为通过极点配置使状态反馈有源阻尼控制系统与无源阻尼系统的被控对象具有相同的极点,以此来得到状态反馈增益矩阵 K_d 与期望的被控对象,再综合系统的特性对PI调节器的参数进行设计。图6所示为状态反馈有源阻尼闭环控制系统结构框图,根据控制框图得到了状态反馈变量 \mathbf{x}_d 对电压 v_d 的传递函数与系统的开环传递函数,分别如表达式(5)和式(6)所示(y_d 为 d 轴状态变量)。其中 K_{pwm} 为SPWM环节传递函数, i_{gdref} 为入网电流参考值, G_c 为控制器传递函数, $A_d = [-R_1/L_1 \ 0 \ -1/L_1; \ 0 \ -R_2/L_2 \ 1/L_2; \ -1/C \ 1/C \ 0]$, \mathbf{x}_d 为状态反馈量, B_{d1} 、 \mathbf{x}_d 、 C_d 是对受控系统进行 dq 轴解耦,由 d 轴模型的状态空间表达式得到,其值分别为 $B_{d1} = [1/L \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 、 $\mathbf{x}_d = [i_d \ i_{gd} \ u_{cd}]^T$ 、 $C_d = [0 \ 1 \ 0]$ 。

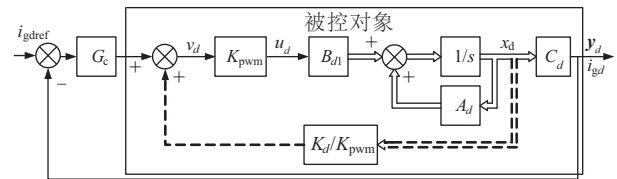


图6 闭环控制系统结构框图

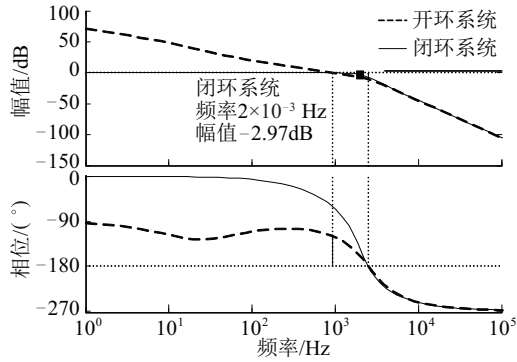
Fig. 6 Closed-loop control system structure diagram

$$G_d(s) = \frac{x_d}{v_d} = K_{pwm}(sI - A_d)^{-1}B_{d1} \quad (5)$$

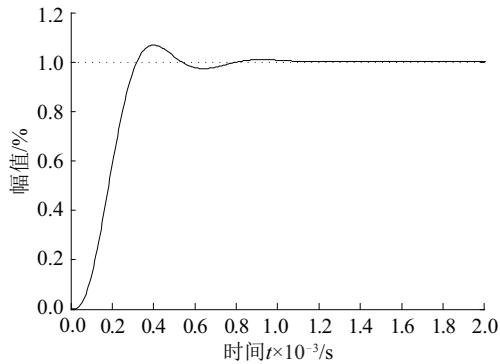
$$G(s) = G_c(s)G_d(s)[I + \frac{k_d}{K_{pwm}}G_d(s)]^{-1} \quad (6)$$

对被控系统进行 dq 轴解耦,得到状态反馈有源阻尼闭环的状态空间表达式 $\Sigma_{k_d}[(A_d + B_{d1}K_d), B_{d1}, C_d]$ 与忽略电网扰动并在滤波电容支路加入阻尼电阻后的无源阻尼系统空间表达式 $\Sigma_{R_d}(A_d^*, B_{d1}, C_d)$,使2个系统具有相同的极点,得到了状态反馈增益矩

阵 $K_d = [-75 \ 75 \ 0]$ 。通过对系统稳定性、动态性能的分析,选择的PI调节器参数为 $K_p = 0.08, K_i = 8$ 。图7所示为该参数下系统的Bode图和单位阶跃响应曲线。从曲线可看出,满足设计要求。



a. 开环和闭环Bode图

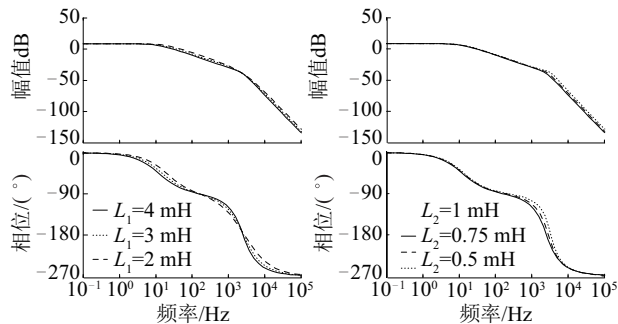


b. 单位阶跃响应曲线

图7 系统的Bode图和单位阶跃响应曲线

Fig. 7 Bode diagram and unit step response curve of system

综合系统参数分析,得到下文所示当滤波电感变化时,在本文提出的控制方案下被控对象的Bode图。由图8可知当电感发生变化时本文采用的PI调节器参数可以使系统保持稳定。



a. 逆变器侧电感 L_1 变化

b. 网侧电感 L_2 变化

图8 电感变化时被控对象的Bode图

Fig. 8 Bode diagram of controlled object when inductance changes

3 仿真实验验证

根据图6所示的全状态反馈有源阻尼控制策略,建立了三相并网逆变器系统的仿真模型,仿真参数如表2所示。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

U_d/V	e_{ab}/V	f_s/kHz	I/A	L_1/mH	L_2/mH	$C/\mu F$
700	380	10	10	4	1	5

注: U_d —直流侧电压; e_{ab} —电网线电压; f_s —开关频率; I —给定电流; L_1, L_2 —滤波电感; C —滤波电容。

对系统进行仿真,得到并网电流波形如图9所示,从图中可知并网电流在1个基波周期内即能跟踪上给定,满足动态响应要求。

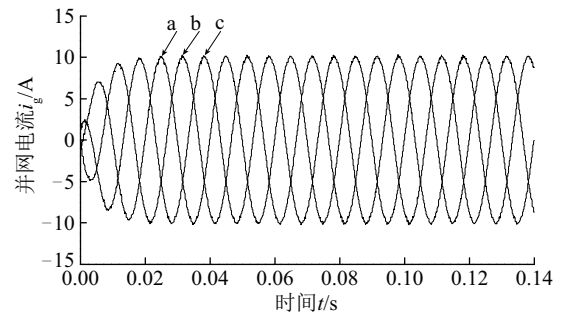


图9 并网电流波形

Fig. 9 Grid current waveform

a相网侧电流和电网电压的波形图如图10所示,从图看出网侧电流 i_{ga} 与电网电压可实现同频同相。综合仿真结果可见,在该控制方式下,系统可以稳定运行。

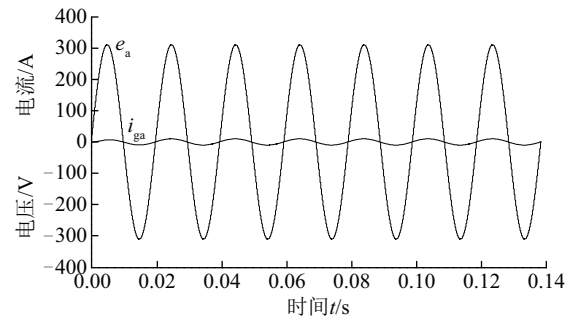


图10 a相电网电压与并网电流波形

Fig. 10 a phase grid voltage and grid current waveform

图11所示为a相电流的频谱分析图,由图可见,并网电流的谐波与基波幅值之比均在0.3%范围内且总谐波畸变率 $THD = 0.81\%$, 不仅满足了

IEEEStd1547-2003(第 1 个规范分布式电源并网的标准)规定的并网要求,也满足对并网电流 THD 的要求。

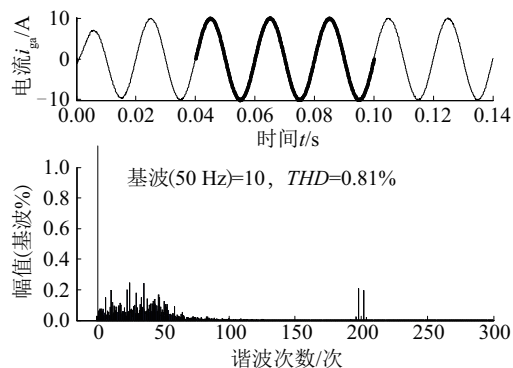


图 11 a 相电流频谱分析

Fig. 11 a phase analysis of current

采用仿真中的模型,搭建基于 DSP 的 LCL 滤波并网逆变器系统,对控制方案进行实验验证。图 12 为状态反馈有源阻尼控制情况下测得的 a 相电网电压与并网电流的实验波形,可见电网电压与网侧电流保持同频同相。图 13 所示为并网电流的

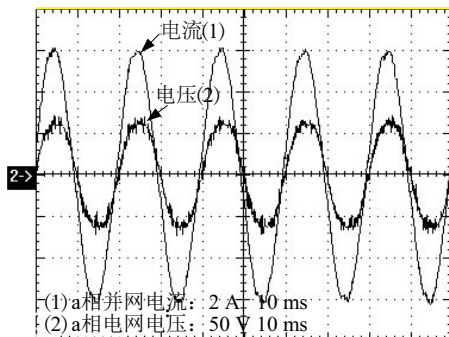


图 12 状态反馈有源阻尼并网电流与电网电压波形

Fig. 12 State feedback active damping grid current and power grid voltage waveform

Voltage = n/a		Current = 4.2995 V		True Power = n/a	
Voltage THD = n/a		Current THD = 2.345 %			
Power Factor = n/a		Displacement Power Factor = n/a			
Apparent Power = n/a		Reactive Power = n/a			
参数	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS
Fundamental	50.150 Hz				4.2936 V
Harmonic 2	100.30 Hz				7.3759m V
Harmonic 3	150.45 Hz				25.891m V
Harmonic 4	200.60 Hz				4.6229m V
Harmonic 5	250.75 Hz				61.232m V
Harmonic 6	300.90 Hz				3.1545m V
Harmonic 7	351.05 Hz				45.036m V
Harmonic 8	401.20 Hz				2.2066m V
Harmonic 9	451.35 Hz				6.3422m V
Harmonic 10	501.50 Hz				2.0562m V
Harmonic 11	551.65 Hz				50.461m V
Harmonic 12	601.81 Hz				4.2046m V
Harmonic 13	651.96 Hz				15.417m V
Harmonic 14	702.11 Hz				5.4109m V
Harmonic 15	752.26 Hz				6.7452m V
Harmonic 16	802.41 Hz				5.9846m V
Harmonic 17	852.56 Hz				10.439m V

图 13 状态反馈有源阻尼并网电流谐波分析

Fig. 13 Harmonic analysis of state feedback active damping grid current

谐波分析,由图 13 可知实验结果与仿真分析保持一致,验证了所用控制方案的正确性和可行性。

4 结 论

本文对基于 LCL 滤波器的三相并网逆变器系统建立了 dq 坐标系下的数学模型,分析 LCL 滤波器参数变化对高频开关纹波衰减和谐振频率的影响,设计了滤波器参数,在此基础上,通过状态反馈将被控对象的极点配置在一定范围内,再结合系统的动态特性和稳态特性设计 PI 调节器参数。通过 Matlab 完成了控制方案的仿真,并搭建系统实验平台,实验结果与仿真结果保持一致,验证了控制策略的正确性和可行性。

【参考文献】

- [1] 邱 燕. 太阳能光伏发电系统应用于绿色建筑的探讨[J]. 价值工程, 2015, (6): 40—41.
- [1] Qiu Yan. Solar photovoltaic power generation system applied in the discussion of the green building[J]. Value Engineering, 2015, (6): 40—41.
- [2] 薛广民, 赵世睿, 马建华. 光伏发电系统在油田物联网中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2015, (1): 94—96.
- [2] Xue Guangming, Zhao Shirui, Ma Jianhua. Photovoltaic power generation system in oil field application of the Internet of things[J]. Instrument user, 2015, (1): 94—96.
- [3] 侯 创, 欧阳达, 窦海林. 居民太阳能光伏发电应用与发展研究[J]. 工程技术, 2015, (3): 73—74.
- [3] Hou Chuang, Ouyang Da, Dou Hailin. The research on residents solar photovoltaic application and development [J]. Engineering Technology, 2015, (3): 73—74.
- [4] 孙运全, 钟剑飞, 盛 吉. 基于 LCL 滤波器的并网逆变器 PI 与重复控制[J]. 低压电器, 2012, (5): 29—33.
- [4] Sun Yunquan, Zhong Jianfei, Sheng Ji. PI and repetitive control of the grid inverter based on the LCL filter[J]. Low voltage electrical appliances, 2012, (5): 29—33.
- [5] Lindgren M, Svensson J. Control of a voltage- source converter connected to the grid through an LCL-filter-application to active filtering[A]. PESC 98 Record, 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists

- Conference (Cat. No.98CH36196)[C]. Fukuoka, Japan, 1998.
- [6] 郭小强, 邬伟扬, 顾和荣, 等. 并网逆变器LCL接口直接输出电流控制建模及稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 102—109.
- [6] Guo Xiaoqiang, Wu Weiyang, Gu Herong, et al. Modelling and stability analysis of direct output current control for LCL interfaced grid-connected inverters[J]. Journal of electrotechnics, 2010, 25(3): 102—109.
- [7] Terzić B, Majić G, Slutej A, et al. Stability analysis of three-phase PWM converter with LCL filter by means of nonlinear model[J]. Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2010, 51(3): 221—232.

STATE FEEDBACK ACTIVE DAMPING CONTROL METHOD APPLIED TO GRID-CONNECTED INVERTER WITH LCL FILTER

Lei Pengjuan¹, Zhao Qinglin², Han Yanlong¹, Zhang Haiduo³

(1. Instrument Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Chengde 067000, China;

2. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China;

3. Materials Company, State Grid Jilin Power Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: Aiming at the resonance problem of LCL filter for three-phase grid inverter system, the mathematical model of three-phase grid inverter system which is based on the LCL filter is established. Next, the effects on the high frequency switching ripple attenuation and resonance frequency when the LCL filter parameters change are analyzed, at the same time, the parameters of the filter is designed. On this basis, a new method of state feedback active damping control is brought up: The pole of the controlled object is controlled in certain scope through state feedback. And then, the parameters of the PI regulator is designed combining with the steady state and dynamic of the system. Finally, the simulation of the control scheme is completed using MATLAB software. The correctness and effectiveness of the proposed control strategy are verified by the experimental results.

Keywords: LCL filter; grid-connected inverter; state feedback; active damping