有源电力滤波器电流环控制器设计

谢川 博士

主要内容

- 并联型有源电力滤波器基本原理
- 电流环双环控制器设计
- 电感宽范围变化控制策略设计与仿真

主要内容

- 并联型有源电力滤波器基本原理
- 电流环双环控制器设计
- 电感宽范围变化控制策略设计与仿真

并联型有源电力滤波器基本原理

自动化工程学院



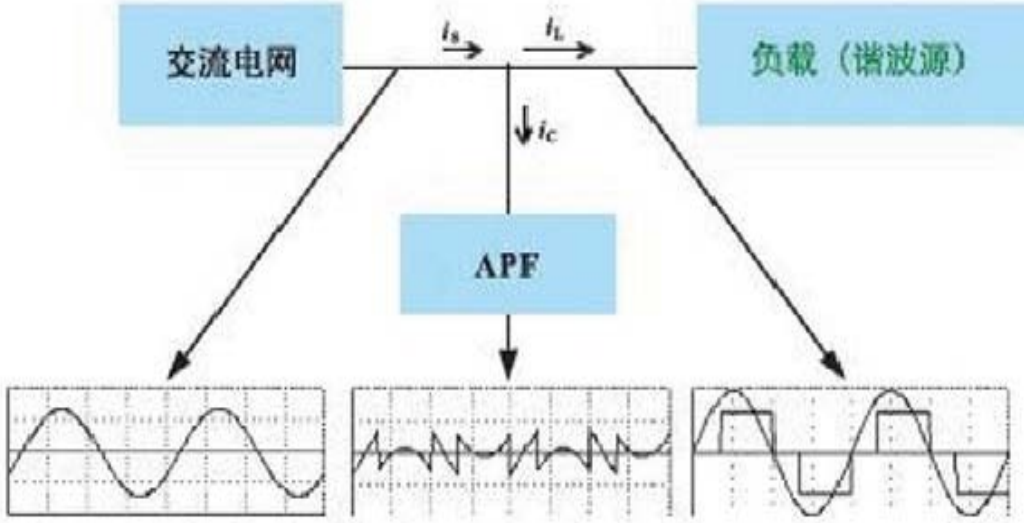


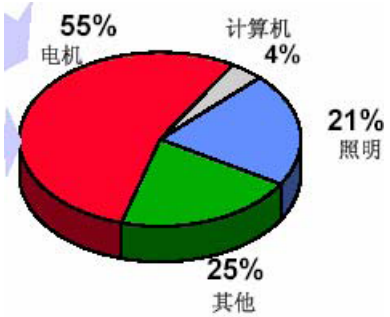


中频感应加热炉



变频器





并联型有源电力滤波器基本原理

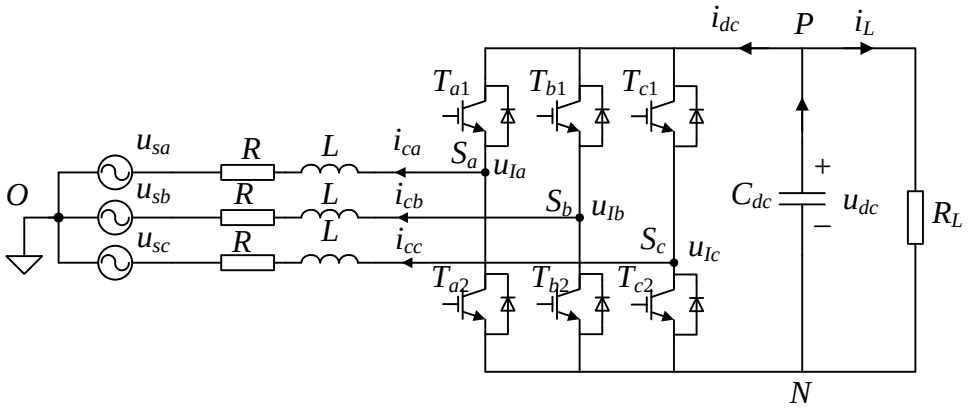
- 主电路拓扑
  - 单相/三相
  - 两电平/多电平
- 谐波检测技术
  - 时域检测谐波算法
  - 频域检测谐波算法
- 电流环控制技术
  - 滞环电流控制
  - 单周控制
  - PI控制
  - 重复控制
  - 比例谐振控制
  - 无差拍控制
- 电网数字同步技术
  - 硬件同步
  - 软件同步

主要内容

- 并联型有源电力滤波器基本原理
- 电流环双环控制器设计
- 电感宽范围变化控制策略设计与仿真

电流环双环控制器设计

➢ 有源电力滤波器数学模型



ABC坐标系：

$$\begin{cases} L\dfrac{di_{ca}}{dt} = u_{Ia} - u_{sa} - Ri_{ca} \\ L\dfrac{di_{cb}}{dt} = u_{Ib} - u_{sb} - Ri_{cb} \\ L\dfrac{di_{cc}}{dt} = u_{Ic} - u_{sc} - Ri_{cc} \\ C_{dc}\dfrac{du_{dc}}{dt} = -(i_{ca}d_a + i_{cb}d_b + i_{cc}d_c) - \dfrac{u_{dc}}{R_L} \end{cases}$$

静止α β坐标系：

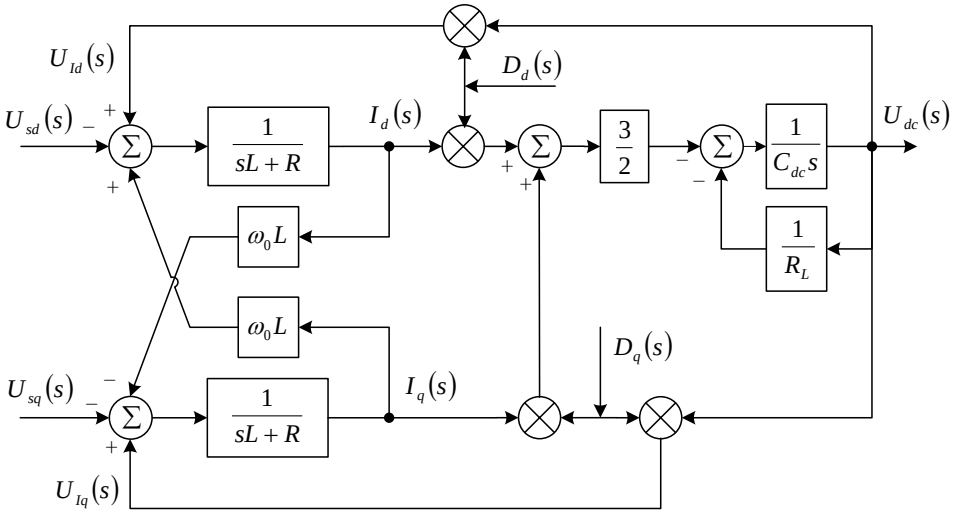
$$\begin{cases} L\dfrac{di_{\alpha}}{dt} = u_{I\alpha} - u_{s\alpha} - Ri_{\alpha} \\ L\dfrac{di_{\beta}}{dt} = u_{I\beta} - u_{s\beta} - Ri_{\beta} \\ C_{dc}\dfrac{du_{dc}}{dt} = -\dfrac{3}{2}(i_{\alpha}d_{\alpha} + i_{\beta}d_{\beta}) - \dfrac{u_{dc}}{R_L} \end{cases}$$

dq坐标系：

$$\begin{cases} L\dfrac{di_d}{dt} = u_{Id} - u_{sd} - Ri_d + \omega_0 Li_q \\ L\dfrac{di_q}{dt} = u_{Iq} - u_{sq} - Ri_q - \omega_0 Li_d \\ C_{dc}\dfrac{du_{dc}}{dt} = -\dfrac{3}{2}(i_d d_d + i_q d_q) - \dfrac{u_{dc}}{R_L} \end{cases}$$

电流环双环控制器设计

自动化工程学院



✓ 变流器输出电压到输出电流s域传递函数：

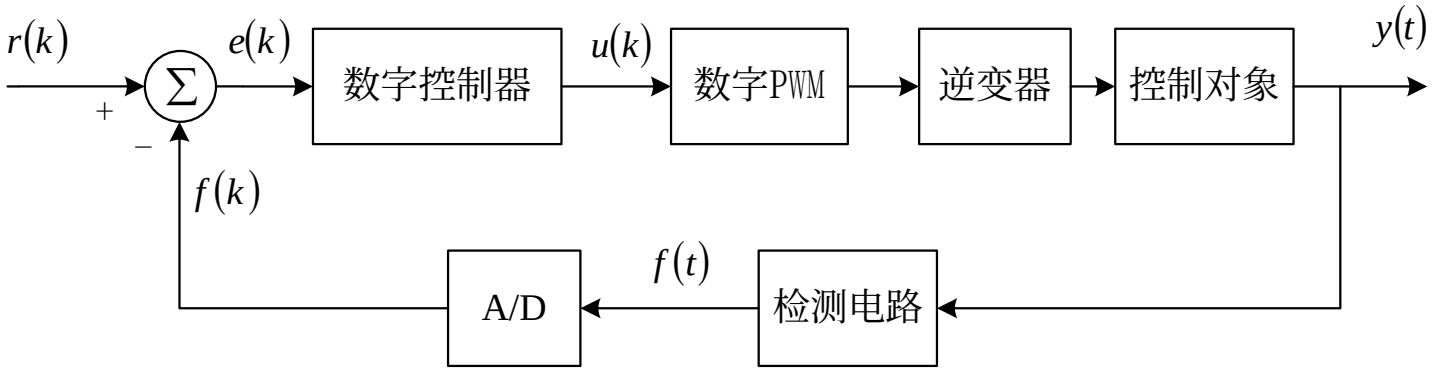
$$G_p(s)=\frac{I_d(s)}{U_{Id}(s)}=\frac{I_q(s)}{U_{Iq}(s)}=\frac{1}{sL+R}$$

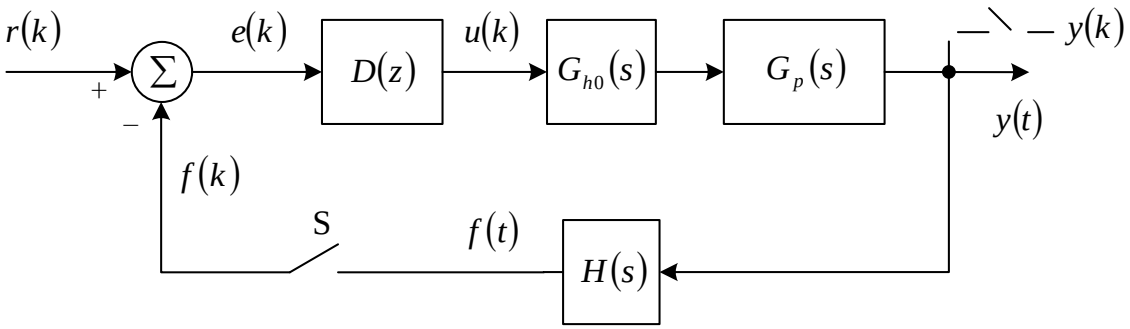
✓ 有功电流到直流侧电压的s域传递函数：

$$G_{vp}(s)=\frac{U_{dc}(s)}{I_d(s)}=-\frac{3}{2}\frac{R_L}{sR_LC_{dc}+1}$$

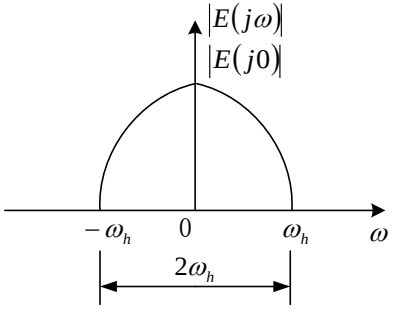
电流环双环控制器设计

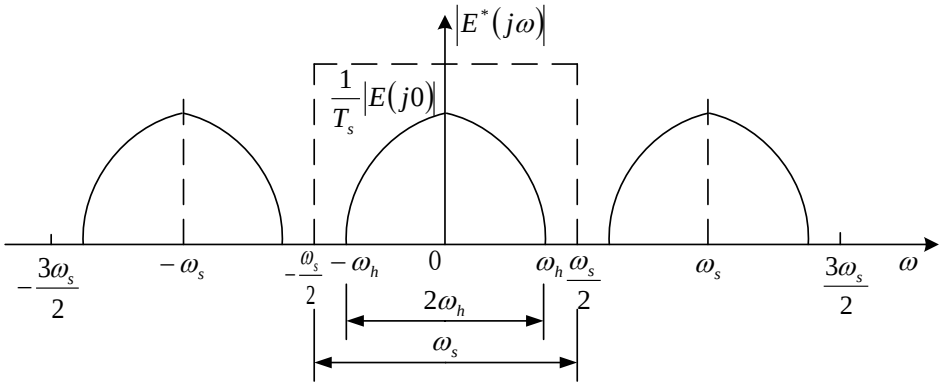
➢ 数字化过程对连续系统性能影响

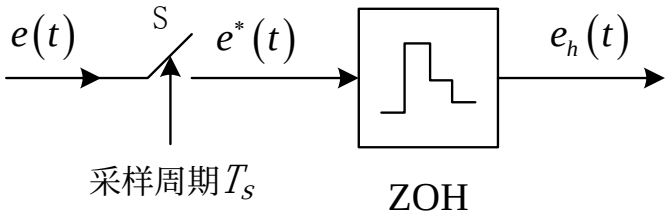


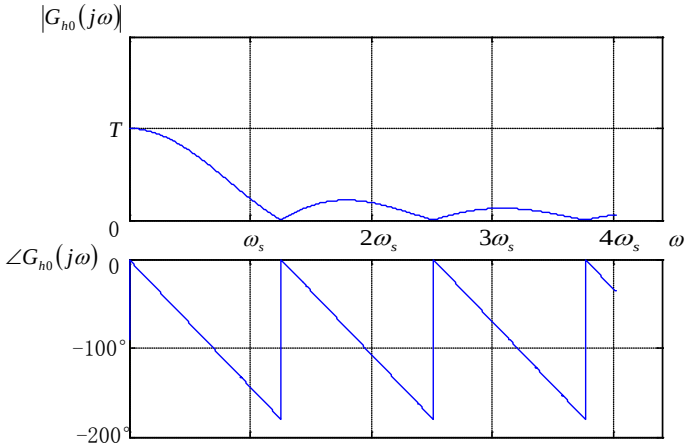


◆信号的采样与重构的影响



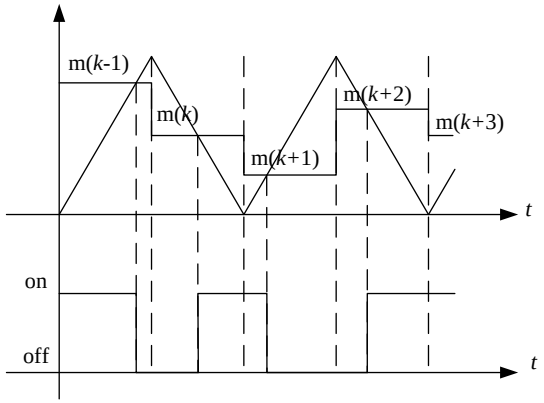


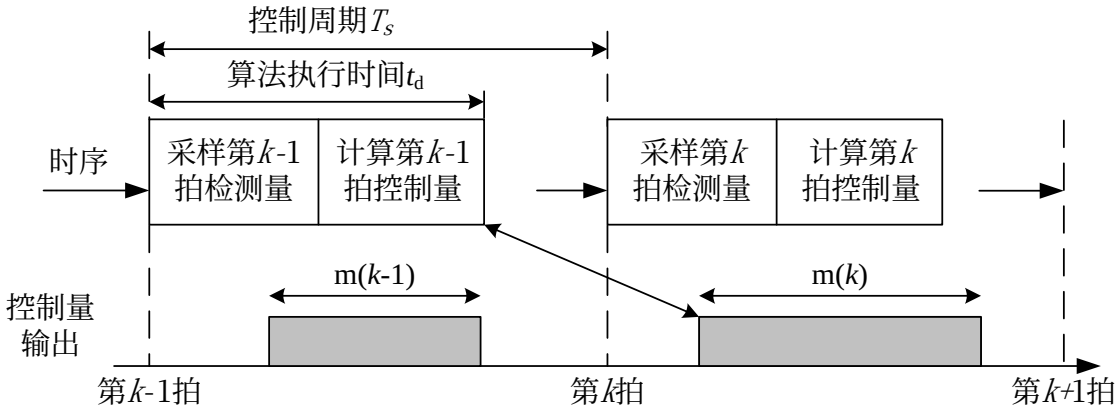




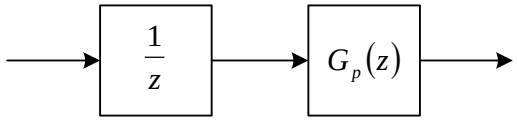
$$G_{h0}(s)=\frac{1-e^{-sT_s}}{s}$$

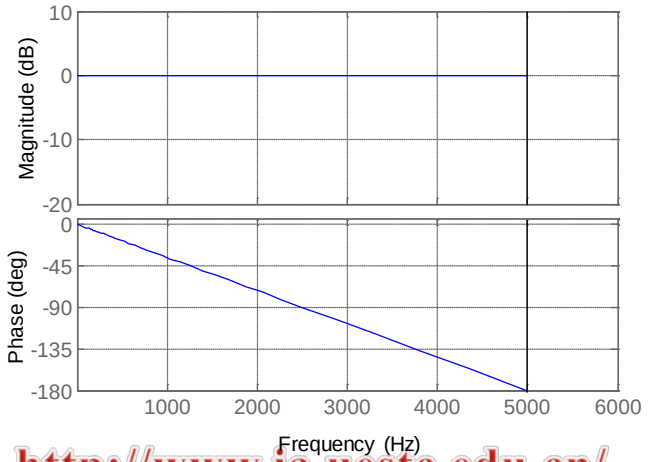
◆数字控制的滞后一拍影响





$$G_n(z)=\frac{1}{z}$$

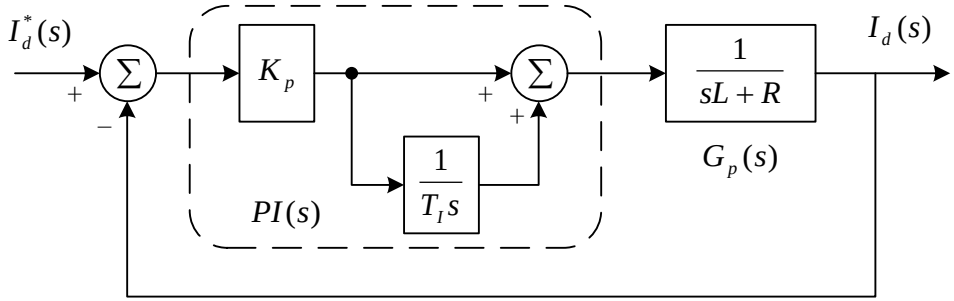


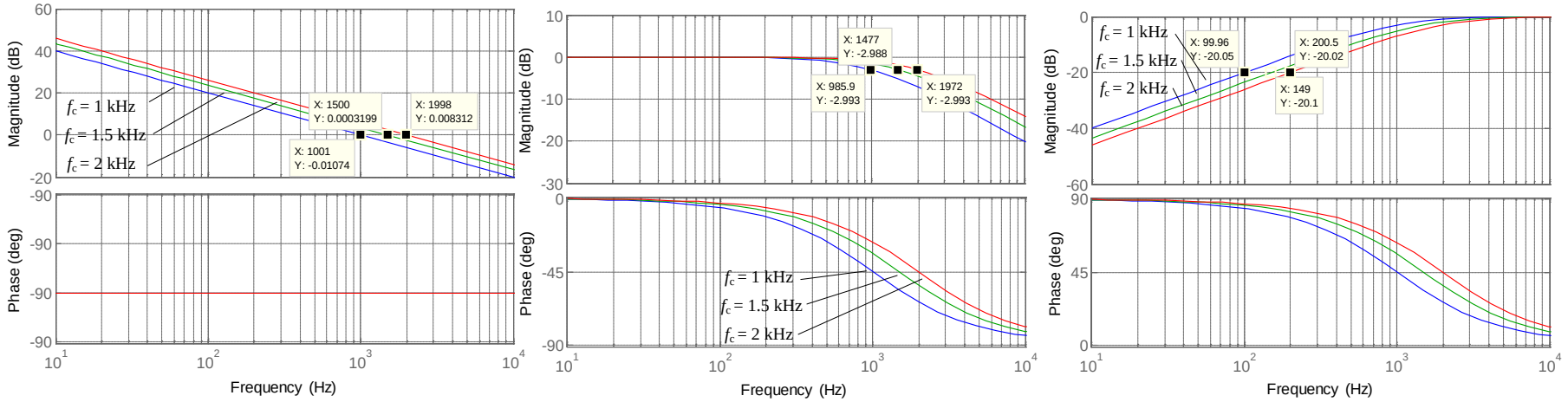


电流环双环控制器设计

自动化工程学院

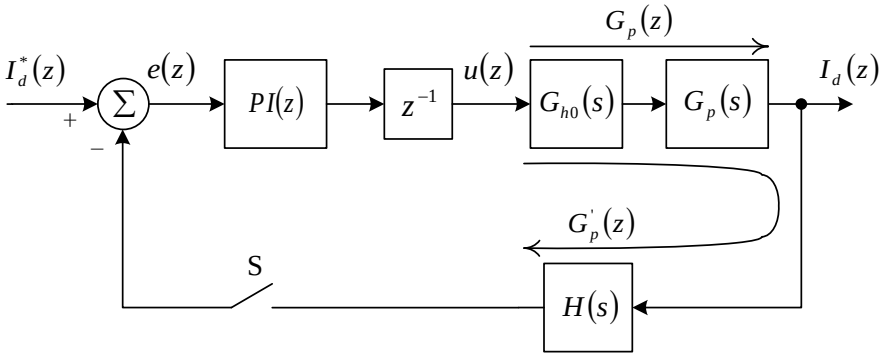
➢ 连续域PI控制器参数设计

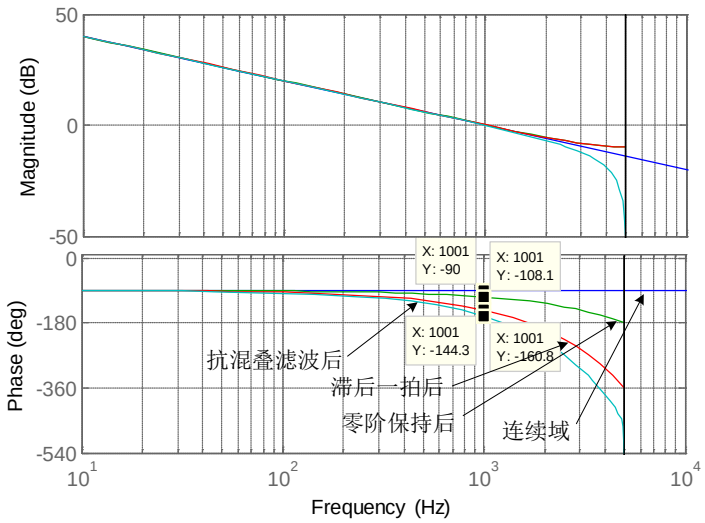


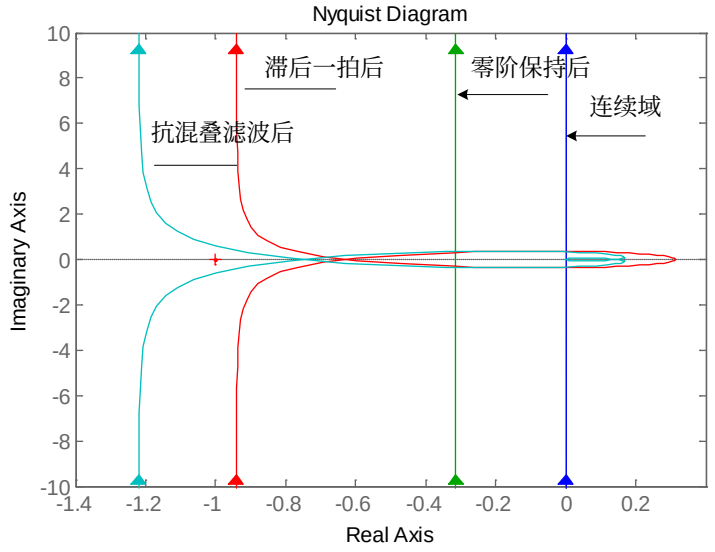


电流环双环控制器设计

◆离散化对电流控制环性能的影响

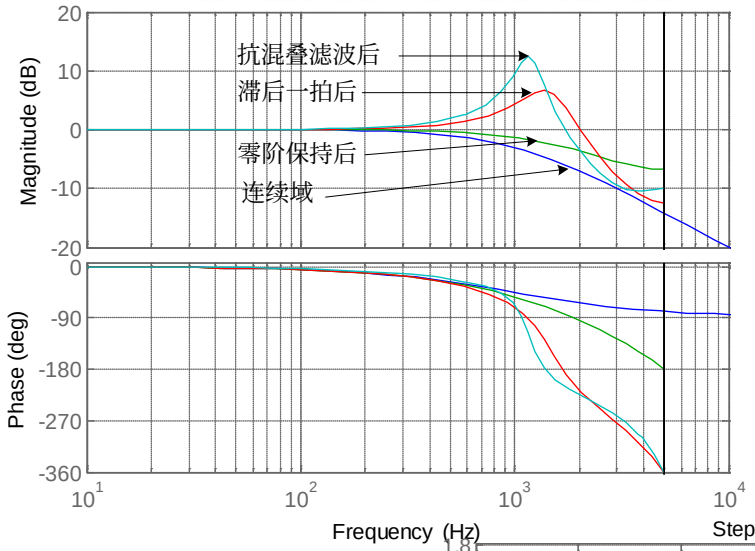


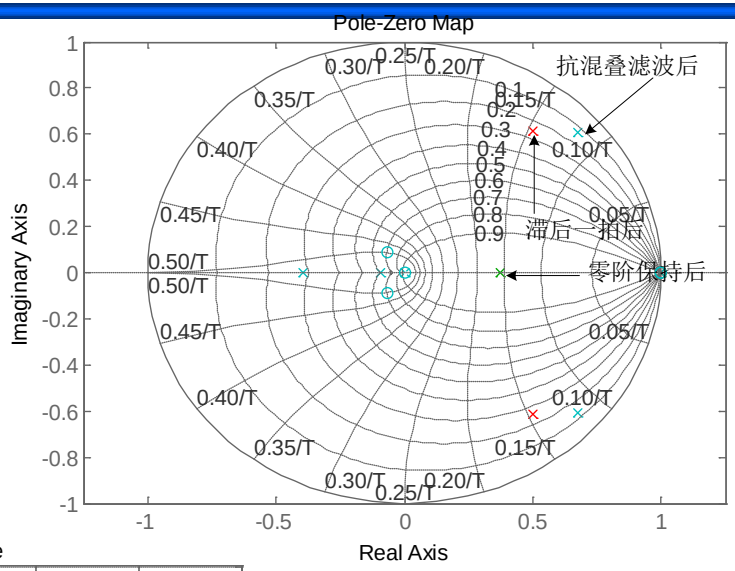


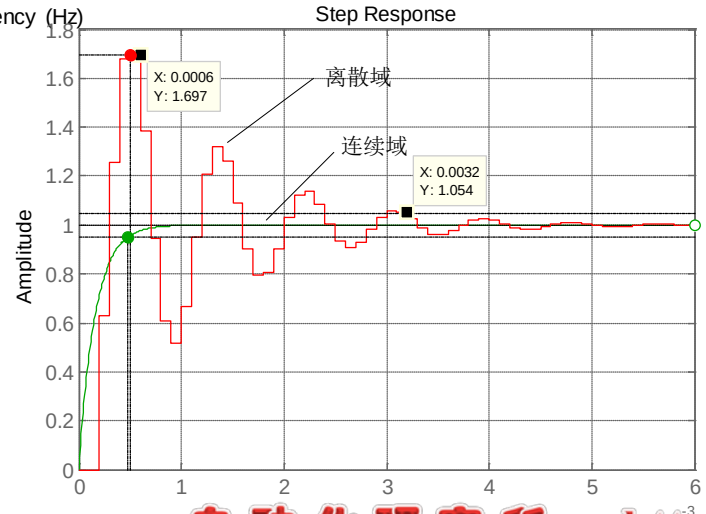


电流环双环控制器设计

自动化工程学院



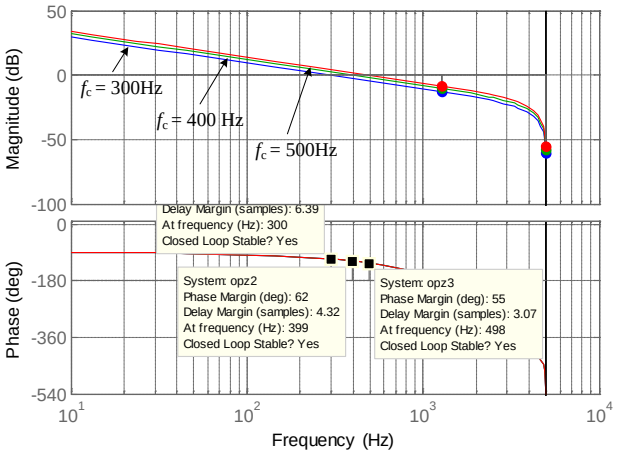


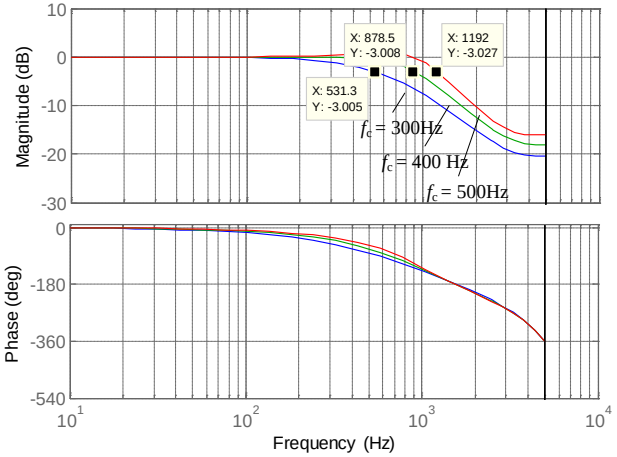


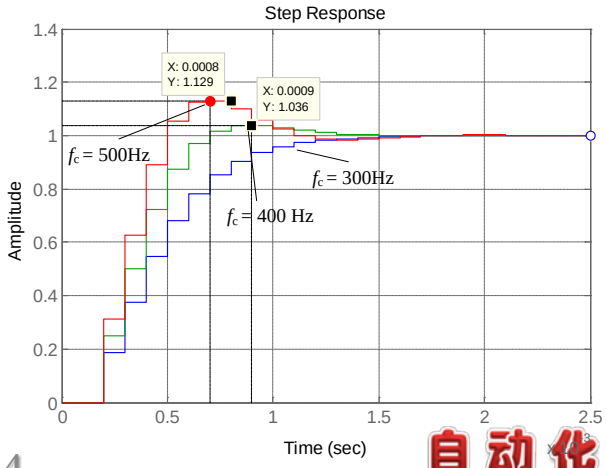
电流环双环控制器设计

自动化工程学院

◆数字PI控制器参数优化







开环穿越频率	相位裕度	闭环带宽	阶跃响应超调
300Hz	70 °	530Hz	0
400Hz	62 °	878Hz	3.6%
500Hz	55 °	1.2kHz	12.9%

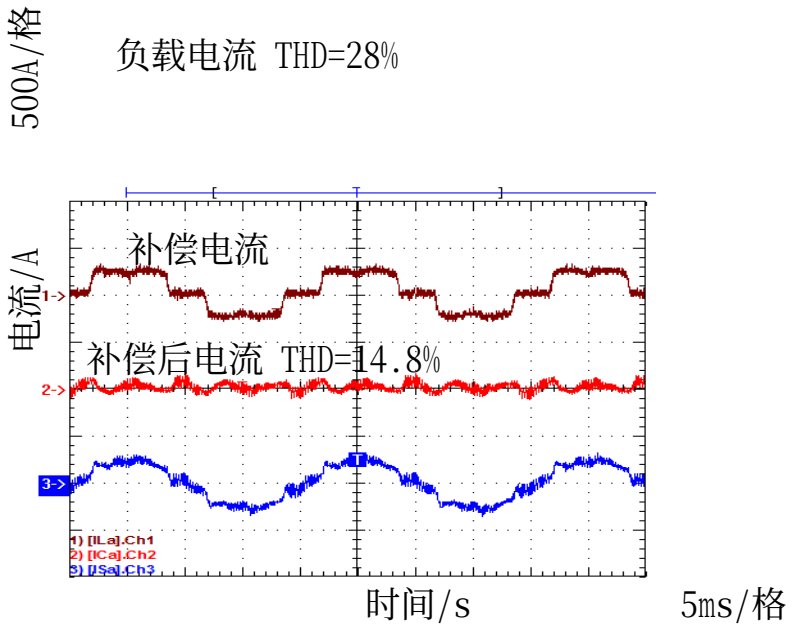
电流环双环控制器设计

➢ 实验结果

380V/400A







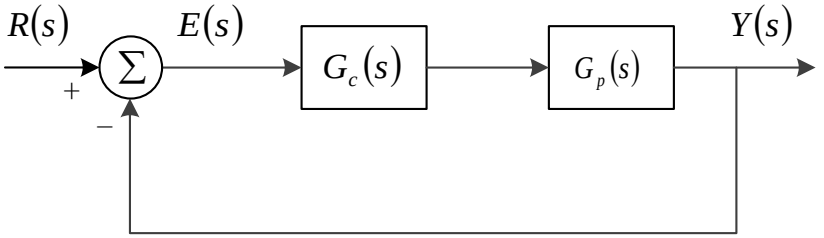
负载谐波电流50A（12.5%负载率）
单PI控制策略补偿效果图

➢ 内模原理与高稳态精度控制器

– 内模原理

➢首先，闭环系统是渐进稳定的；
➢其次，系统的开环传递函数中包括能产生指令信号的数学模型。

$$r(t)=A\cos(\omega_0 t) \Rightarrow R(s)=\frac{As}{s^2+\omega_0^2}$$



$$G_o(s)=G_c(s)G_p(s)=\frac{N_o(s)}{D_o(s)}$$

$$E(s)=\frac{R(s)}{1+G_o(s)}=\frac{D_o(s)R(s)}{D_o(s)+N_o(s)}=\frac{D_o(s)}{(s-\mu_1)(s-\mu_2)\ldots(s-\mu_m)}\frac{As}{(s^2+\omega_0^2)}$$

$$E(s)=\frac{a_1}{s-\mu_1}+\cdots+\frac{a_m}{s-\mu_m}+\frac{b_1}{s-j\omega_0}+\frac{b_2}{s+j\omega_0}$$

$$b_1,b_2=\left[(s\mp j\omega_0)E(s)\right]_{s=\pm j\omega_0}=\frac{D_o(\pm j\omega_0)}{D_o(\pm j\omega_0)+N_o(\pm j\omega_0)}\frac{A}{2}$$

$$D_o(s)=(s^2+\omega_o^2)D'_o(s)$$

$$D_o(\pm j\omega_0)=0$$

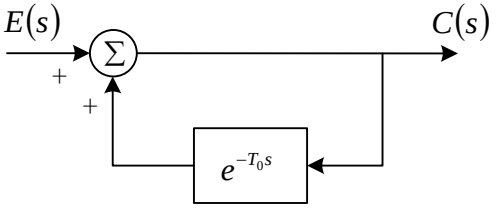
$$N_o(\pm j\omega_0)\neq 0$$

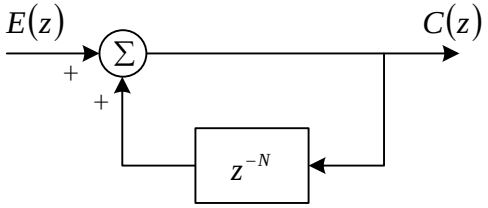
$$b_1=b_2=0$$

电流环双环控制器设计

➢ 内模原理

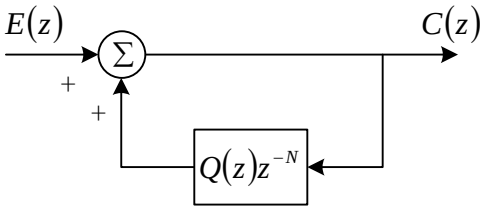
◆重复控制器

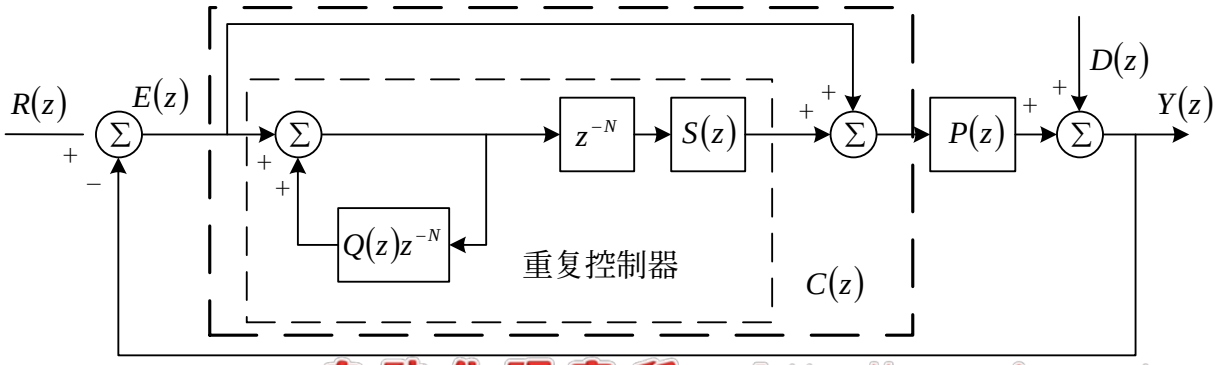




$$c(k) = e(k) + c(k-N)$$

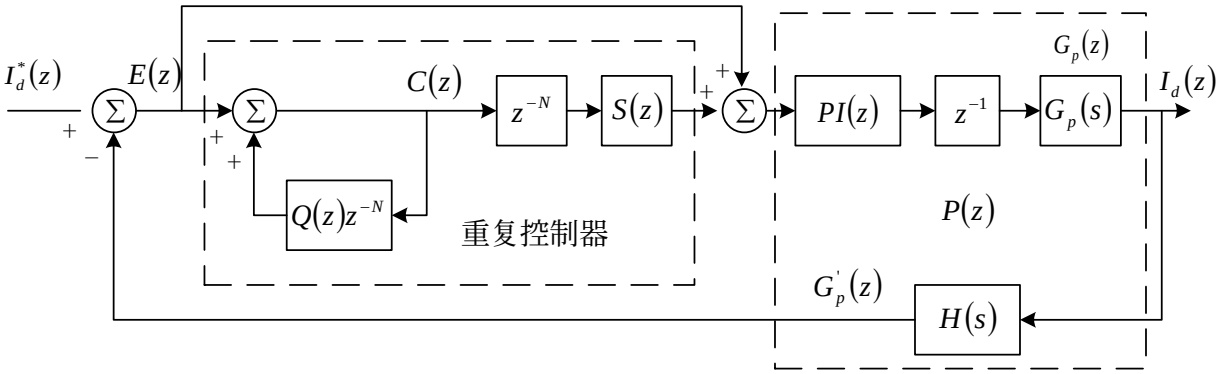
$$G_{im}(s) = \frac{1}{1 - z^{-N}}$$





电流环双环控制器设计

➢ 基于重复控制器电流环控制设计方法

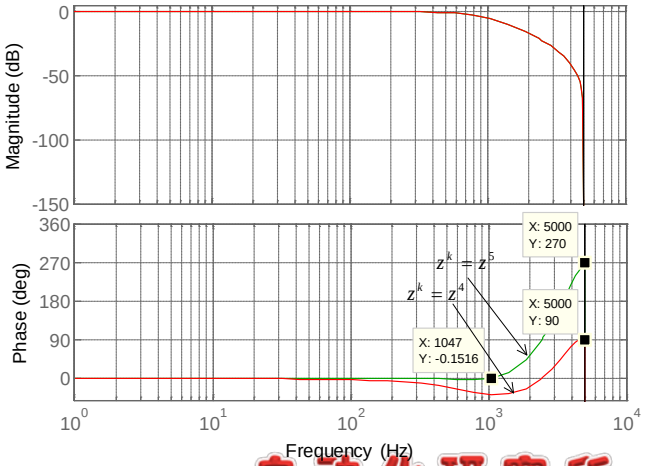


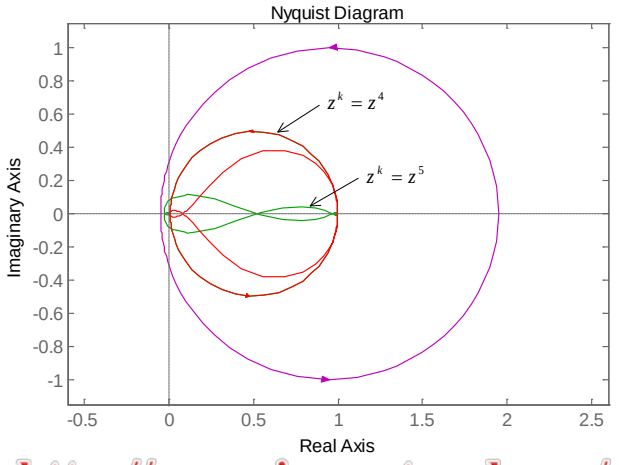
$$S(z) = k_r z^k F_1(z) F_2(z)$$

$$F_1(z) = \frac{z+1}{2z}$$

$$F_2(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2}$$

$$F_2(z) = \frac{az^2 + bz + c}{z^2 + dz + e}$$

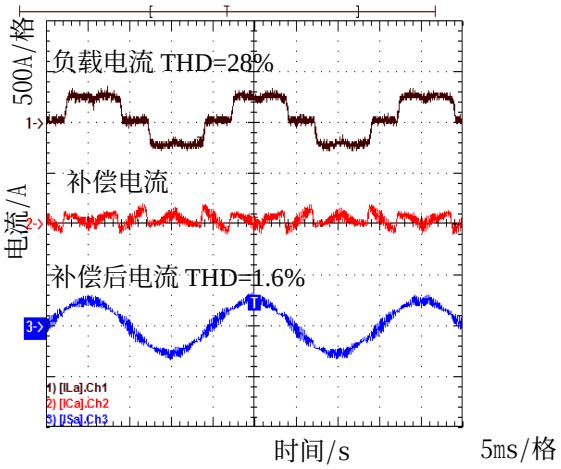




电流环双环控制器设计

➢ 实验结果

负载谐波电流50A（12.5%负载率）



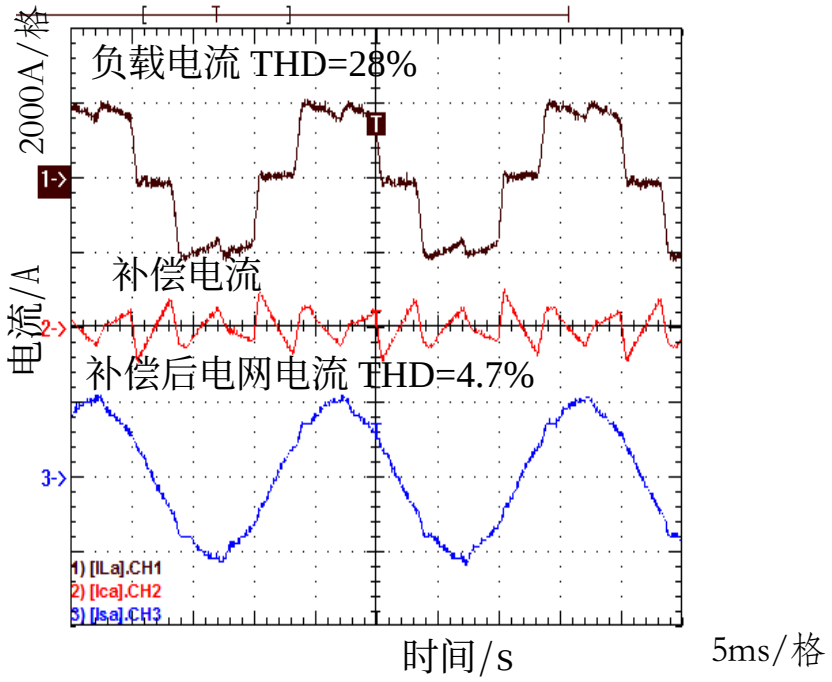
基于重复控制
380V/400A APF稳态补偿效果

谐波次数	负载电流		补偿后电网侧电流			
			PI		REP	
	有效值（A）	百分比	有效值（A）	百分比	有效值（A）	百分比
1	179.1	100.0%	181.1	100.0%	182.9	100.0%
5	41.6	23.2%	16.3	9.0%	0.6	0.3%
7	18.6	10.4%	7.2	4.0%	1.7	0.9%
11	15.5	8.7%	14.7	8.1%	1.7	0.9%
13	8.7	4.9%	8.6	4.7%	0.8	0.4%
17	7.6	4.2%	5.4	3.0%	0.9	0.5%
19	6.2	3.5%	2.5	1.4%	0.2	0.1%
23	4.8	2.7%	6.1	3.4%	0.7	0.4%
25	3.9	2.2%	3.4	1.9%	0.3	0.2%
29	2.8	1.6%	3.3	1.8%	0.2	0.1%
31	2.3	1.3%	1.6	0.9%	0.2	0.1%
35	1.6	0.9%	2.2	1.2%	0.2	0.1%
37	1.4	0.8%	1.2	0.7%	0.2	0.1%
41	1.1	0.6%	1.4	0.8%	0.3	0.2%
43	0.8	0.4%	0.7	0.4%	0.3	0.2%
47	0.8	0.4%	0.8	0.4%	0.2	0.1%
49	0.4	0.2%	0.6	0.3%	0.1	0.1%
TH	50.5	28.2%	26.7	14.8%	2.9	1.6%

电流环双环控制器设计

➢ 实验结果

◆ 谐波补偿满载实验

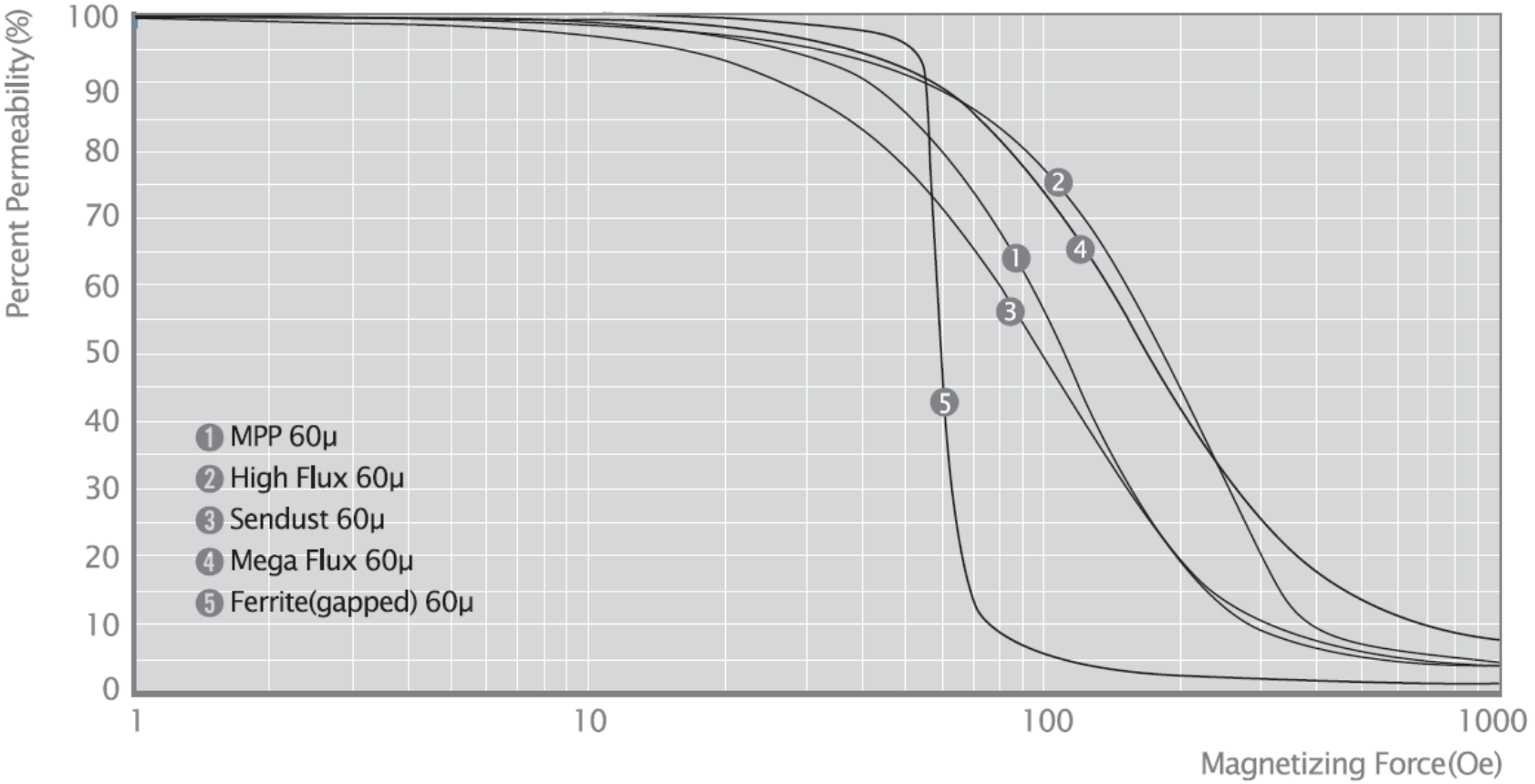


满功率时重复控制380V/400A APF稳态补偿效果

主要内容

- 并联型有源电力滤波器基本原理
- 电流环双环控制器设计
- 电感宽范围变化控制策略设计与仿真

■ 5种不同磁芯的磁特性曲线

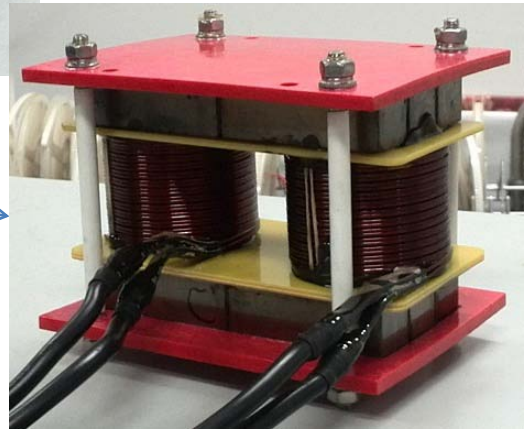


电感宽范围变化控制策略设计与仿真

自动化工程学院



POCOMagnetic



控制对象传递函数：

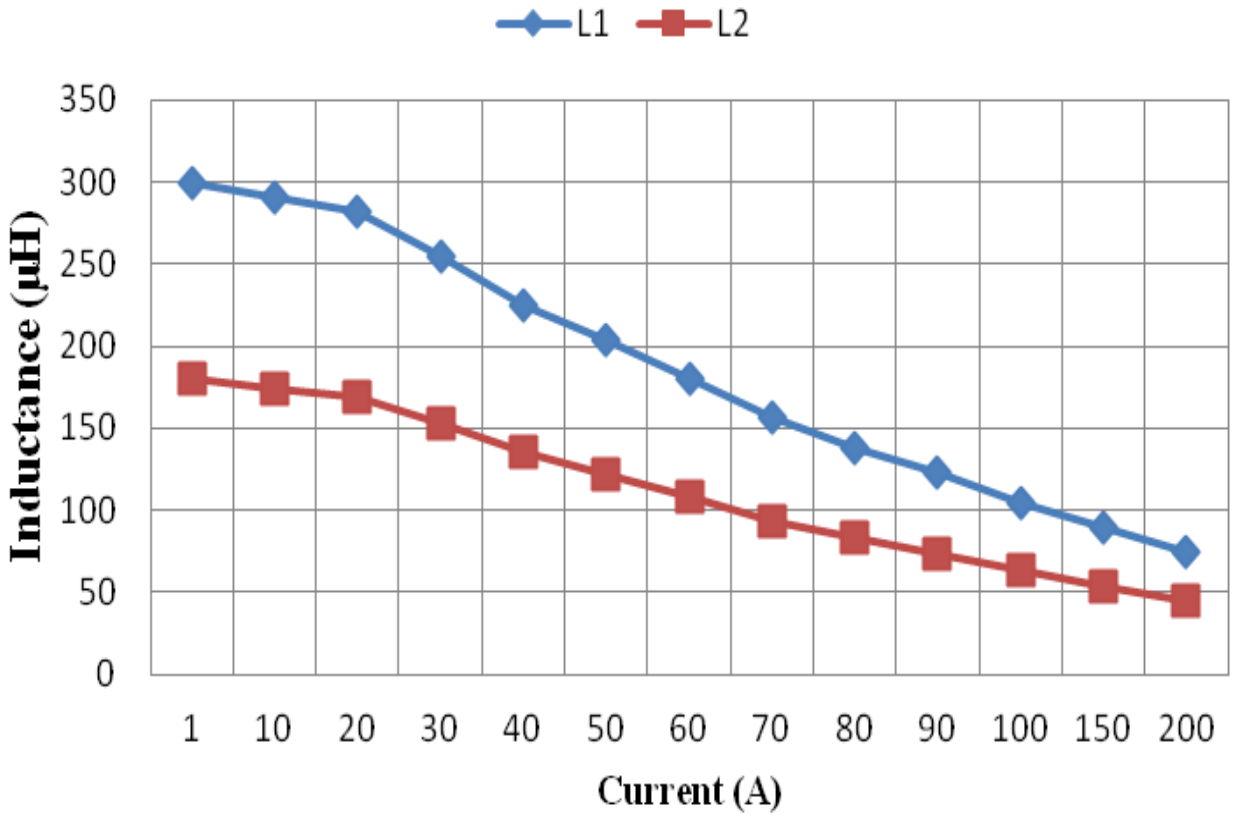
$$G_p(s)=\frac{I_1(s)}{U_i(s)}=\frac{C_f L_2 s^2+1}{L_1(L_2+L_g)C_f s}\cdot\frac{1}{(s^2+\omega_{res}{}^2)}$$

谐振频率点：

$$\omega_{res}=\sqrt{\frac{L_1+L_2+L_g}{L_1(L_2+L_g)C_f}}$$

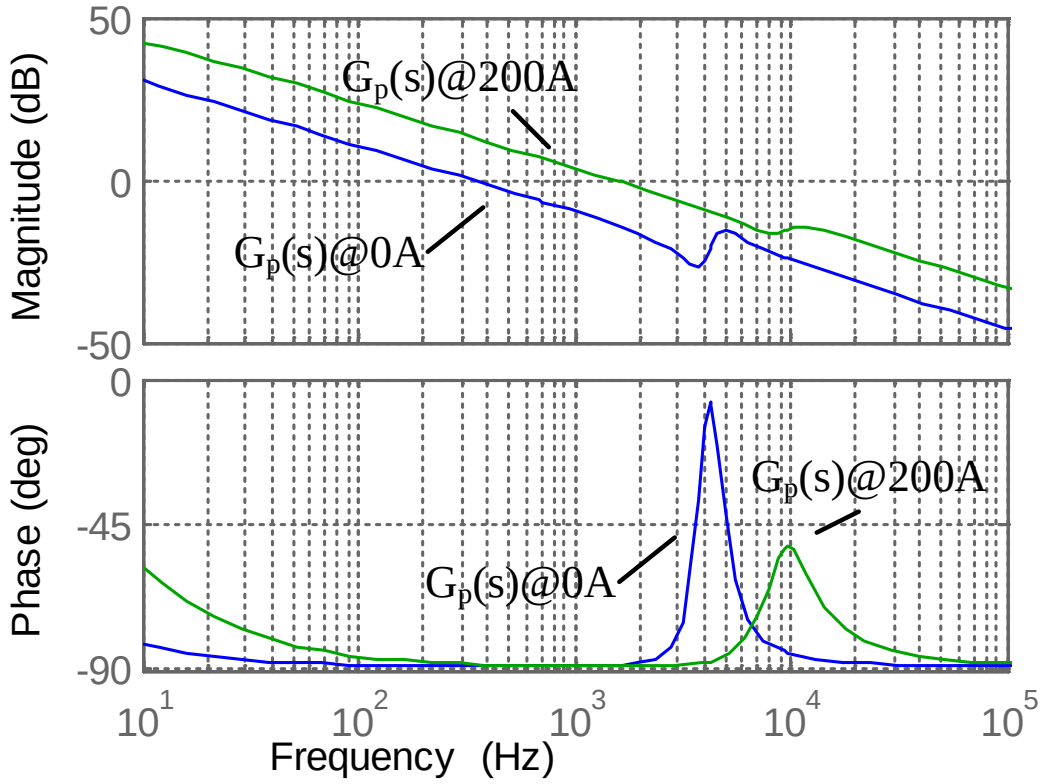
电感宽范围变化控制策略设计与仿真

■ 计算电感量



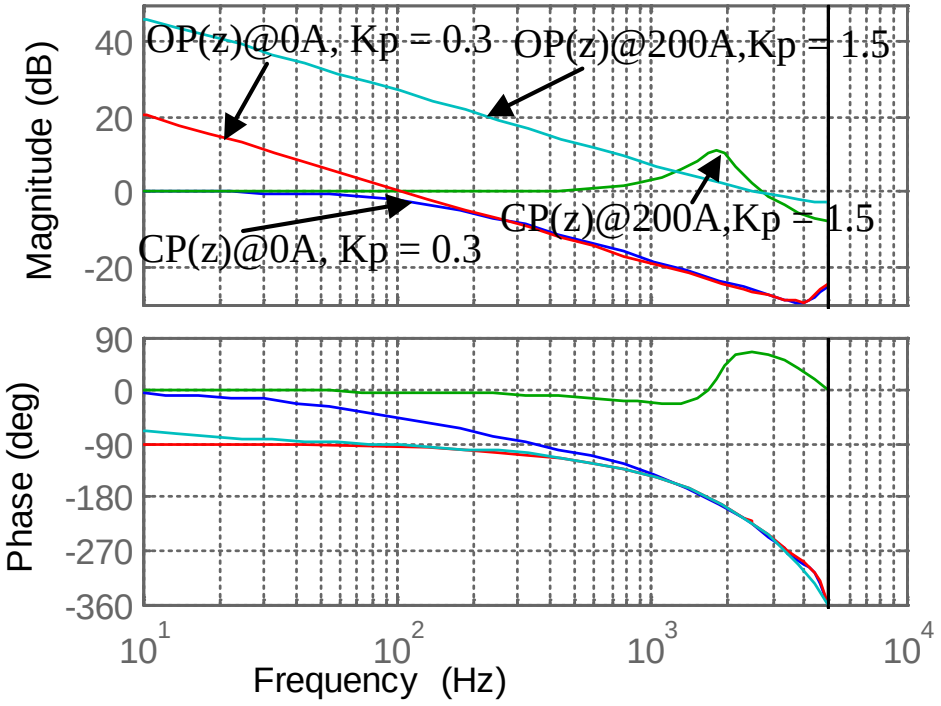
电感宽范围变化控制策略设计与仿真

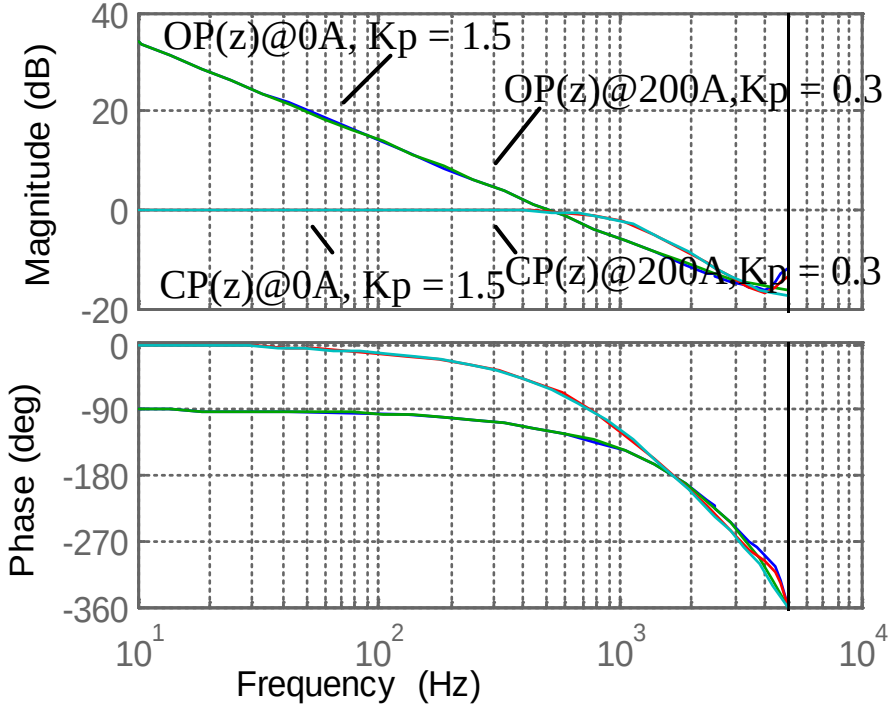
■ 不同电流幅值下被控对象波特图



电感宽范围变化控制策略设计与仿真

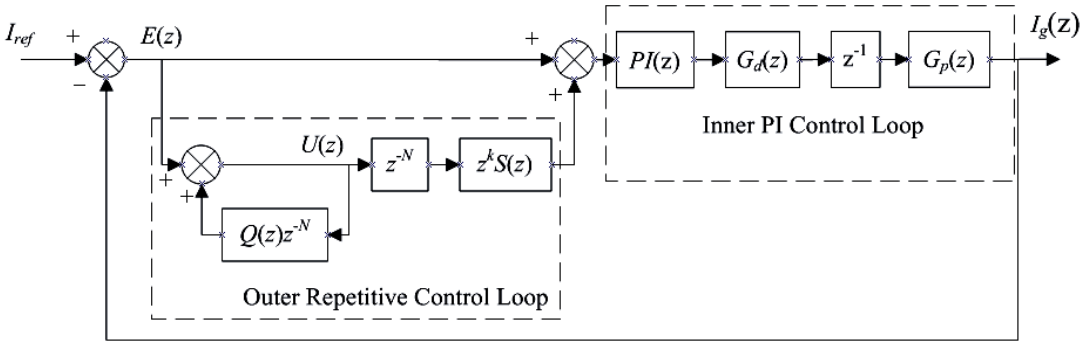
■ 单PI控制开环、闭环波特图

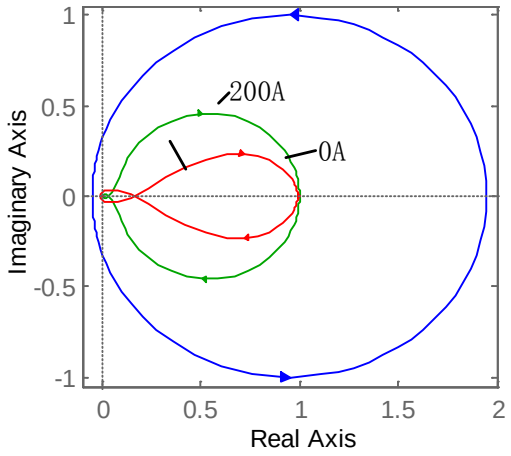




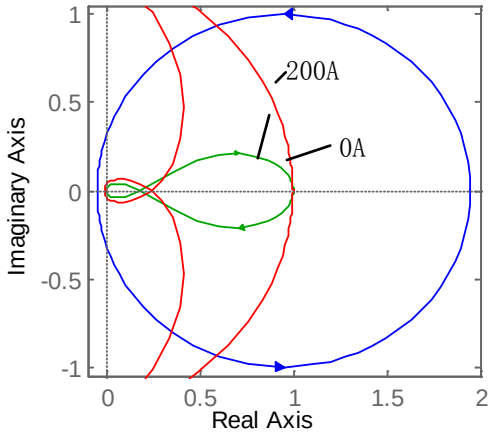
电感宽范围变化控制策略设计与仿真

■ 重复控制稳定性判定





$K_p = 0.3$



$K_p = 1.5$

■ 仿真结果

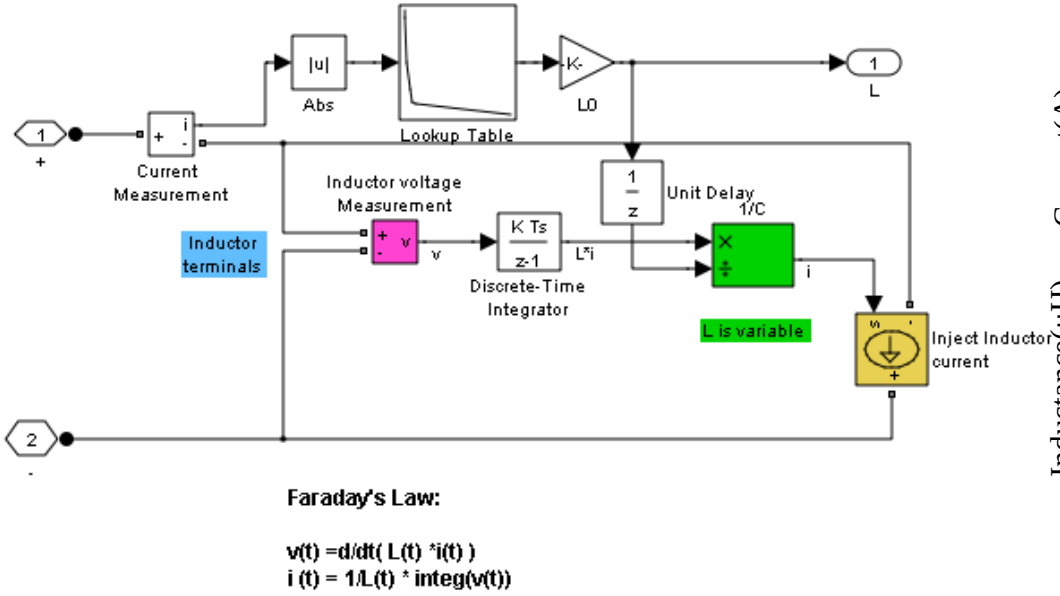
仿真条件

TABLE I
系统参数

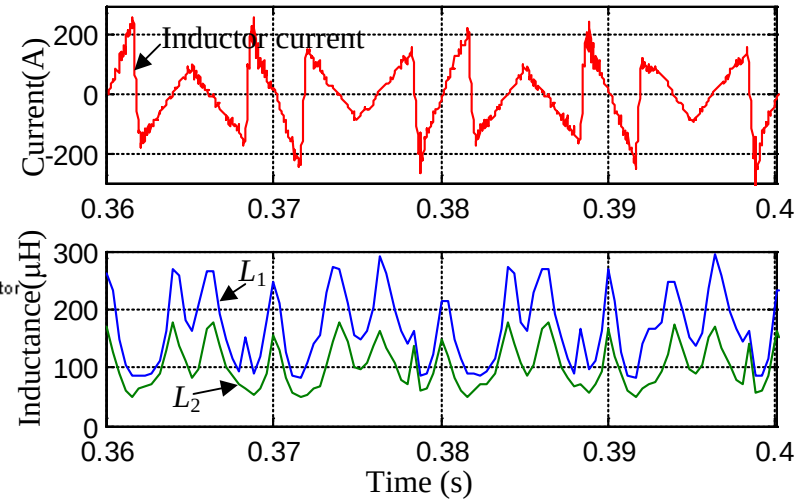
符号	名称	值
E	Line Voltage	380V
f_g	Line frequency	50 Hz
U_{dc}	DC-link voltage	750V
P_N	Nominal Power	66.7 kVA
f_c	Switching frequency	10 kHz

电感宽范围变化控制策略设计与仿真

■ 仿真结果



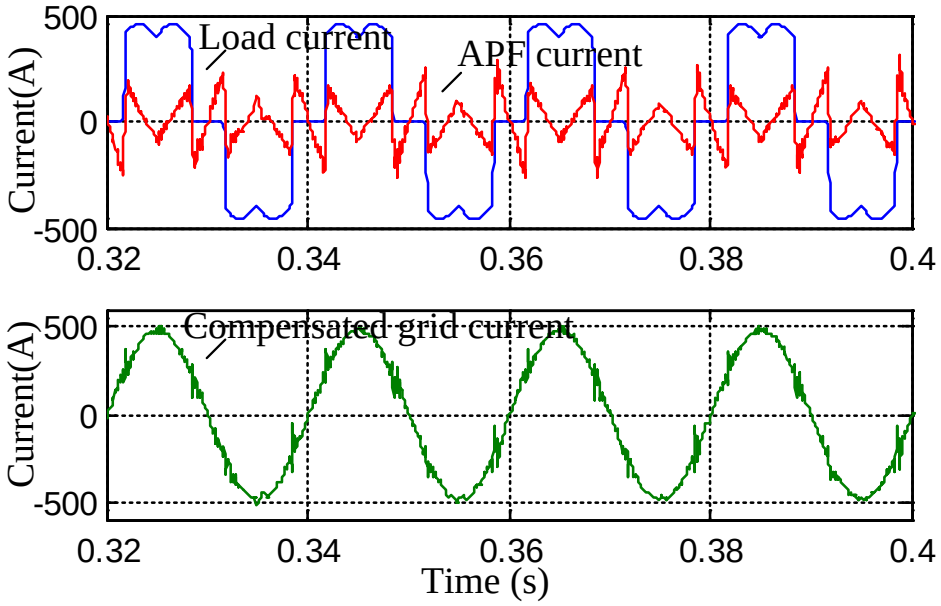
变电感仿真模型

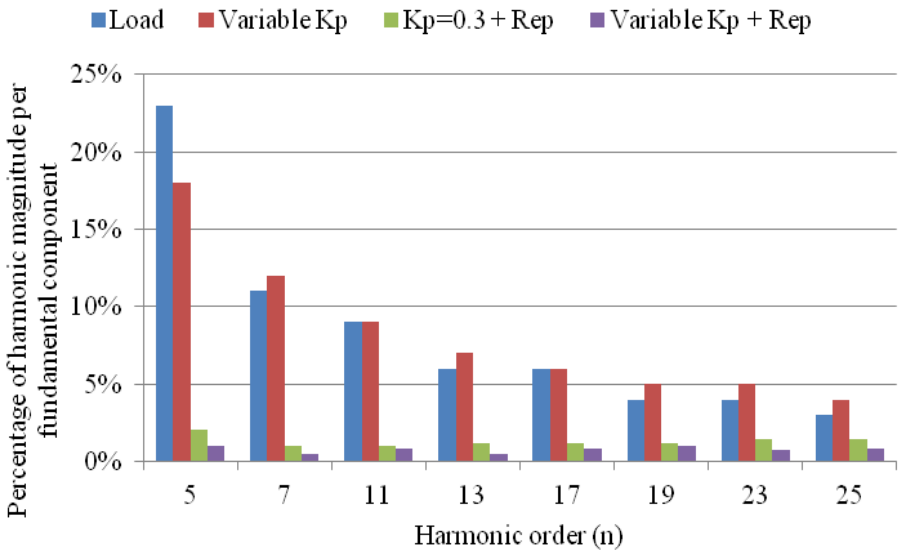


电感仿真波形

电感宽范围变化控制策略设计与仿真

■ 仿真结果



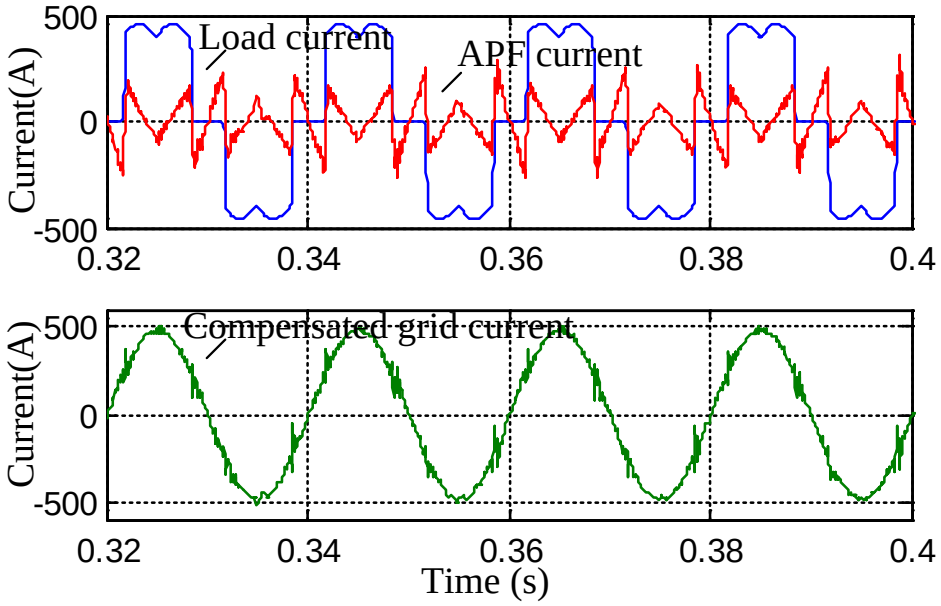


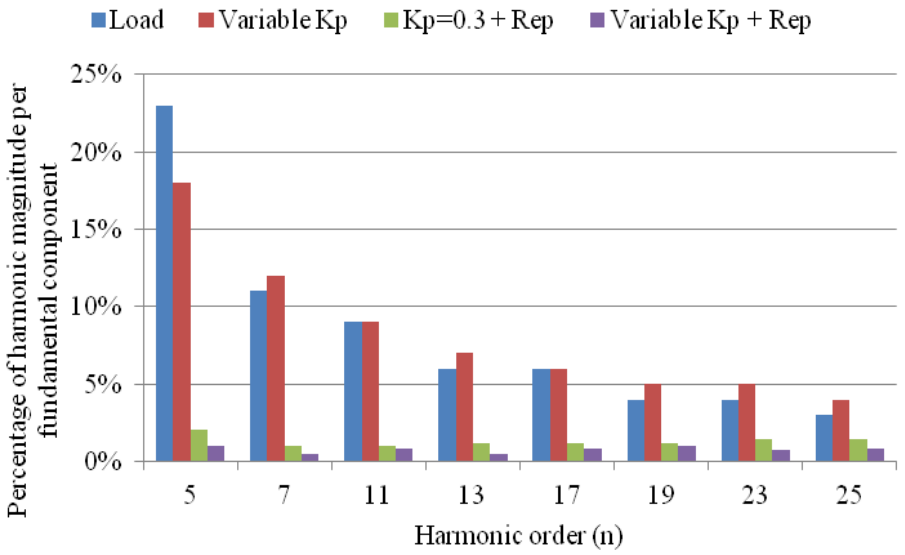
负载电流THD ： 29%

补偿后电网THD：26.5%（单PI控制），3.8%（双环控制），2.2%（变Kp控制双环控制）

电感宽范围变化控制策略设计与仿真

■ 仿真结果





负载电流THD ： 29%

补偿后电网THD：26.5%（单PI控制），3.8%（双环控制），2.2%（变Kp控制双环控制）

谢谢各位！

Email: c.xie@uestc.edu.cn