配电网 STATCOM 输出 LCL 滤波器特性分析及参数设计

王存平 尹项根 张哲 文明浩
（华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室 武汉 430074）

摘要 配电网 STATCOM（D-STATCOM）输出滤波器参数的选择影响到开关谐波的滤除和系统的工作性能。本文主要从电感基波压降、STATCOM 无功调节能力、开关谐波电流衰减度、滤波器谐振频率等方面分析了 LCL 滤波器的特性，提出基于这些条件的滤波器参数设计方法。另外，本文在滤波器阻尼电阻上并联一个小电感，大大减小了滤波器的功率损耗。通过仿真验证，表明所设计 LCL 滤波器参数具有很好的滤波效果，同时滤波器具有较大的通带宽度，使得D-STATCOM具有一定的谐波补偿能力。

关键词：配电网 STATCOM LCL 滤波器 开关谐波 电感基波压降 无功调节能力
中图分类号： TM464

Characteristic Analysis and Parameter Design of Output LCL Filter in D-STATCOM

Wang Cunping Yin Xianggen Zhang Zhe Wen Minghao
（State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074 China）

Abstract The parameters of output filter in distribution network STATCOM (D-STATCOM) greatly affect the attenuation of switching harmonics and the performance of the system. This paper analyses the characteristics of LCL filter from the aspects of the fundamental inductor voltage drop, the reactive power compensation ability of STATCOM, the attenuation of switching harmonics, and filter resonant frequency. Then a parameter design method of LCL filter is proposed based on these constraints. In addition, the power loss of the filter is greatly reduced by connecting a small inductor in parallel with the damping resistor in this paper. The simulation results show that the designed LCL filter parameters have good filtering effects, and the filter has larger pass-band width, making D-STATCOM to have the function to compensate some harmonics.

Keywords：D-STATCOM, LCL filter, switching harmonics, fundamental inductor voltage drop, reactive power compensation ability

国家 863 计划资助项目（ 2009AA05Z208）。
收稿日期 2010-11-02 改稿日期 2011-02-23

1 引言

静止同步补偿器 （STATCOM）是一种维持系统电压稳定、提高电能质量的重要电力电子设备，近年来得到迅速发展 [1-2]。STATCOM 的发展方向主要有两个：一是用于高压输电网中的高压大功率 STATCOM 技术；二是适用于配电网中的 D-STATCOM 技术。D-STATCOM 技术受到越来越广泛的重视，目前对于 D-STATCOM 的研究主要集中在主电路拓扑结构 [3]及多目标控制策略方面 [4-5]，对于其输出滤波器参数设计的研究比较少。

LC 与 LCL 滤波器在 APF 及其他并网逆变器中得到了广泛应用[6-8]，与单电感 L 滤波器相比，LC 与 LCL 滤波器减小了电感值，并且具有较好的滤波效果[9]。本文指出，LCL 与 LC 滤波器在结构上是可以等效的，只是 LCL 滤波器增大了电网侧电感，从而减小了注入电网电流的开关谐波含量，并且减小了网侧电感变化造成的影响，所以，LCL 滤波器比 LC 滤波器具有更好的性能。

滤波器参数设计是一个复杂的问题，需要考虑许多因素，本文分析了 LCL 滤波器参数对滤波电感基波压降、STATCOM 无功调节能力、开关谐波电流衰减度等方面的影响，并提出依据这几方面设计滤波器参数的方法；另外，本文在滤波器电容支路阻尼电阻上并联一个小电感，减少了滤波器的功耗。最后通过无功谐波负载仿真验证，表明所设计的滤波器参数具有很好的效果。

2 LCL 滤波器特性分析

采用 LCL 输出滤波器的 STATCOM 装置结构如图 1 所示，其中，u_s 表示电网电源电压，Z_s 表示电源及线路阻抗，T 是配电变压器，Z_L 表示负载阻抗。L_1、L_2、C、R 构成 STATCOM 交流侧输出 LCL 滤波器。

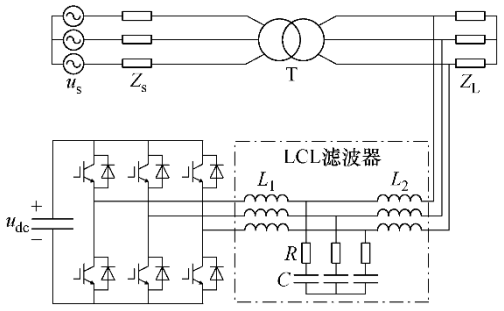


图 1 采用 LCL 滤波器的 STATCOM 装置结构图

Fig.1 Structure of STATCOM with LCL output filter

在实际中，负载阻抗一般远大于电源阻抗，所以在系统等效电路中，LCL 滤波器网侧电感 L_2 与一个近似等于电源电抗的电感 L_s 相连。实际上，LCL 滤波器与 LC 滤波器在结构上可以认为是一致的，只是 LC 滤波器的网侧电感等于电源电感 L_s，而 LCL 滤波器的网侧电感 L_2+L_s 远大于 L_s。由于 L_2 的加入，既避免了电网电感变化对滤波效果造成的影响，同时也加大了滤波器电网侧电抗，使得开关谐波尽可能地从电容支路流过，进一步减小了注入电网电流的高频谐波含量。

下面主要从电感基波压降、STATCOM 无功调节能力、开关谐波电流衰减度等方面来对 LCL 滤波器的特性进行研究。

2.1 电感基波压降

逆变器输出电压过高会对开关器件及直流电容的耐压水平要求更高，影响器件寿命，所以要尽量使逆变器输出电压小一些。在系统电压一定时，也即要求滤波电感上的压降要小一些。

图 2 是含 LCL 滤波器的 STATCOM 装置单相等效电路图，其中，u_{inv} 表示 STATCOM 逆变器交流侧输出电压，u_{pcc} 表示 STATCOM 与电网连接点的电压，i_{inv} 表示 STATCOM 主电路逆变器输出电流，i_{com} 表示经过滤波器之后，注入到电网的电流，i_s 表示电网电源输出电流。为了便于分析，采用并联电阻 R_L 加电感 X_L 的负载模型。

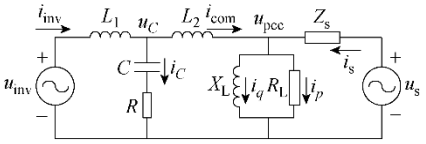


图 2 STATCOM 系统单相等效电路图

Fig.2 Single-phase equivalent circuit of STATCOM

负载电流由两部分组成：无功电流 i_q 与有功电流 i_p。假定 STATCOM 完全补偿负载无功，即 i_q= i_{com}；忽略 STATCOM 的功率损耗，则电源输出有功功率等于负载有功，即 $i_p = i_s$。由此可以得到图 2 中各个变量的相量图，如图 3 所示。因为与 C 的电抗相比，电阻 R 很小，可以忽略，所以电容电流近似与连接点电压夹角为 90°。

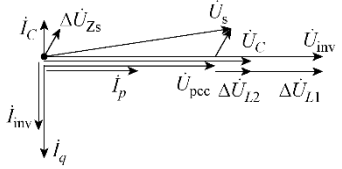


图 3 图 2 中各变量相量图

Fig.3 Vector diagram of variables in Fig.2

由图 3 可以得到

$$\begin{cases} u_{\text{inv}} = u_{\text{pcc}} + \Delta u_{L2} + \Delta u_{L1} \\ u_C = u_{\text{pcc}} + \Delta u_{L2} \\ \Delta u_{L2} = i_{\text{com}} X_{L2} \\ \Delta u_{L1} = i_{\text{inv}} X_{L1} \\ i_C = \dfrac{u_C}{X_C} \\ i_{\text{com}} = i_{\text{q}} = \dfrac{u_{\text{pcc}}}{X_L} \\ i_{\text{inv}} = i_{\text{q}} - i_C \end{cases} \tag{1}$$

式中，$X_{L1}=\omega L_1$，$X_{L2}=\omega L_2$，$X_C=1/(\omega C)$，并且式中变量均为标量。由式（1）可以解得滤波器电感上总的基波压降为

$$\Delta u_L = \Delta u_{L1} + \Delta u_{L2} = \left(\frac{X_{L1}+X_{L2}}{X_{\text{L}}} - \frac{X_{L1}}{X_C} - \frac{X_{L1}X_{L2}}{X_C X_{\text{L}}} \right) u_{\text{pcc}}$$

$$\approx \frac{X_{L1}+X_{L2}}{X_{\text{L}}} u_{\text{pcc}} = (X_{L1}+X_{L2}) i_{\text{com}} \tag{2}$$

由式（2）可见，在稳态情况下，滤波电感上的总基波压降 ΔU_L 基本与总电感感抗 $X_{L1}+X_{L2}$ 成正比，也即与总电感值成正比。所以，为了减小逆变器输出电压，总电感值 L_1+L_2 不能太大。

需要指出，以上是以感性负载为基础推导的，对于容性负载，具有类似的结论。

2.2　STATCOM 无功调节能力

STATCOM 输出电流经过滤波器前后的比值 $i_{\text{inv}}/i_{\text{com}}$ 反映 STATCOM 装置的无功调节能力[10]，$i_{\text{inv}}/i_{\text{com}}$ 越接近 1，装置无功调节能力越强，为了提高装置无功调节能力，要求电容支路电流尽量小。

由式（1）可求得 $i_{\text{inv}}/i_{\text{com}}$ 的表达式为

$$\frac{i_{\text{inv}}}{i_{\text{com}}} = 1 - \frac{X_{\text{L}}+X_{L2}}{X_C} \tag{3}$$

用同样的方法，对于 LC 滤波器，可以得到

$$\frac{i_{\text{inv}}}{i_{\text{com}}} = 1 - \frac{X_{\text{L}}}{X_C} \tag{4}$$

两式相比可见，在负载电抗 X_{L} 及滤波电容容抗 X_C 确定的情况下，使用 LCL 滤波器时 STATCOM 的无功调节能力较使用 LC 滤波器时稍差一点。这是因为使用 LCL 滤波器时，由于 L_2 的存在，使得电容电压 u_C 增大，电容产生的无功电流变大。

2.3　谐波电流衰减幅度

由前面分析知，在图 2 中 LCL 滤波器右边的电路可以等效为电源电感 L_{s}，记 $L_{\text{g}}=L_2+L_{\text{s}}$，求得逆变器侧电流 i_{inv} 对逆变器电压 u_{inv} 的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{i_{\text{inv}}(s)}{u_{\text{inv}}(s)} = \frac{L_{\text{g}}Cs^2 + RCs + 1}{L_1 L_{\text{g}} Cs^3 + RC(L_1+L_{\text{g}})s^2 + (L_1+L_{\text{g}})s} \tag{5}$$

设 L_{s}=0.05mH，固定 C=40μF，R=1Ω，取不同的 L_1、L_2 值，做 $G_1(s)$ 的幅频响应曲线，如图 4 所示。其中，曲线 1：L_1=0.8mH、L_2=0.3mH；曲线 2：L_1=1.0mH、L_2=0.3mH；曲线 3：L_1=0.8mH、L_2=0.1mH。

比较曲线 1 与曲线 2 可得，L_1 增大，对整个频率范围内电流衰减幅度都增大；比较曲线 1 与曲线 3 可得，L_2 增大，对低频段（谐振频率之前）电流的衰减作用增大，而对高频段（谐振频率之后）电流的衰减几乎没有影响。结合理论分析可知，总电感值 L_1+L_2 决定低频段电流的衰减度；L_1 值决定逆变器侧高频段电流的衰减度。

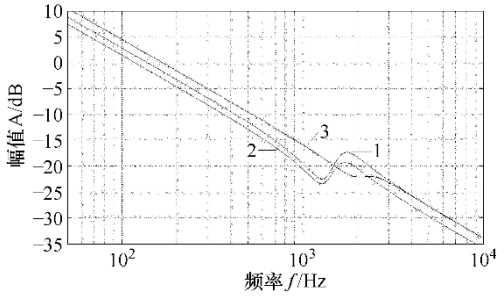


图 4　不同电感取值下 $G_1(s)$ 的幅频响应曲线

Fig.4　Amplitude-frequency response curves of $G_1(s)$ with different L_1, L_2 values

另外，经过 LCL 滤波器后的电流（即注入电网的电流）i_{com} 与逆变器侧电流 i_{inv} 之比的传递函数为

$$K(s) = \frac{i_{\text{com}}(s)}{i_{\text{inv}}(s)} = \frac{RCs+1}{L_{\text{g}}Cs^2 + RCs + 1} \tag{6}$$

取不同的 L_2、C 值，做 $K(s)$ 的幅频响应曲线，如图 5 所示。曲线 1：L_2=0.1mH、C=40μF；曲线 2：L_2=0.2mH、C=40μF；曲线 3：L_2=0.1mH、C=50μF。

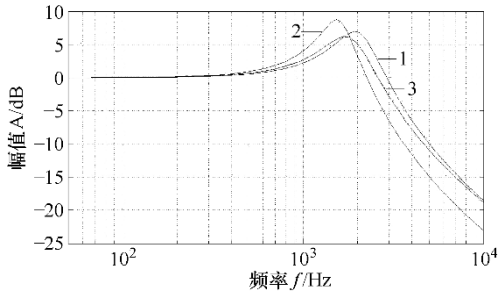


图 5 不同 L_2、C 取值下 $K(s)$ 的幅频响应曲线

Fig.5 Amplitude-frequency response curves of K(s) with different L_2, C values

在图 5 中，比较曲线 1 与曲线 2 可见，L_2 增大，高频段电流经过滤波器后衰减比例增大，低频段电流变化不大，这是因为频率越高，电容电抗与 L_2 电抗相差越大。由曲线 1 与曲线 3 相比可知，增加电容值对电流衰减比例影响不大。所以， L_2 的值主要决定注入电网的高频电流的衰减比例， L_2 越大，注入电网的高频谐波电流越小。

另外，由理论分析及幅频响应曲线可得，阻尼电阻 R 越大对滤波器谐振的抑制能力越强，同时对逆变器侧高频电流衰减有利；但是对于注入电网高频电流的衰减不利，同时也增大了功耗。

3 D-STATCOM 输出 LCL 滤波器参数设计

D-STATCOM 输出 LCL 滤波器参数设计受多种因素制约，如：滤波效果、补偿效果、动态响应等。结合以上分析，本文从电感基波压降、STATCOM 无功调节能力、逆变器侧开关谐波电流含量、注入电网开关谐波电流衰减比例、滤波器谐振频率等方面来设计 LCL 滤波器参数。

3.1 参数约束条件

（1）由前面分析知，滤波器总电感值 L_1+L_2 主要决定低频段电流的衰减度， L_1+L_2 越大，低频谐波电流衰减越明显，对于基波电流的衰减也增大，使得电感上基波压降增大。为了限制逆变器输出电压，综合考虑，要求滤波器总电感基波压降不得超过系统电压的 20%，可得

$$I_{\mathrm{N}}(\omega L_1+\omega L_2)\leqslant 0.2U_{\mathrm{pcc}} \tag{7}$$

（2）为了获得较大的 STATCOM 无功调节能力，要求滤波电容上的基波电流不超过 STATCOM 额定输出电流的 5%，即

$$\frac{U_{\mathrm{pcc}}+I_{\mathrm{N}}\omega L_2}{1/(\omega C)}\leqslant 0.05I_{\mathrm{N}} \tag{8}$$

（3）电感 L_1 主要决定逆变器侧开关谐波电流的大小。逆变器侧开关谐波电流过大，会使 IGBT 结温波动增大，影响功率器件寿命，同时会使 L_1 损耗增加，使其温升增加，降低绝缘材料寿命。所以，要限制逆变器侧开关谐波电流在一定范围，要求 L_1 满足以下条件[11]：

$$L_1\geqslant\frac{1}{8}\frac{U_{\mathrm{dc}}}{f_{\mathrm{s}}\Delta i_{\max}} \tag{9}$$

式中，$\Delta i_{\max}$ 为逆变器侧开关谐波电流含量最大允许值。

（4）注入电网的开关谐波电流的衰减比例主要由 L_2 值决定。不考虑阻尼，式（ 6）可简化为

$$\frac{i_{\mathrm{com}}(s)}{i_{\mathrm{inv}}(s)}=\frac{1}{L_{\mathrm{g}}Cs^2+1} \tag{10}$$

将 s=jω_{s} 代入上式，得到 开关谐波 电流经过滤波器之后的衰减比例为（ ω_{s} 是开关角频率）

$$\frac{i_{\mathrm{com}}(\omega_{\mathrm{s}})}{i_{\mathrm{inv}}(\omega_{\mathrm{s}})}=\left|\frac{1}{1-L_{\mathrm{g}}C\omega_{\mathrm{s}}^2}\right| \tag{11}$$

根据电流衰减比可以得到 L_2 的一个约束条件。

（5）对于 D-STATCOM，主要补偿负载无功功率，同时也可能补偿一些谐波电流，要求滤波器具有一定的通带宽度。综合考虑，将 LCL 滤波器谐振频率 f_{c} 设置在 20 倍基频到 0.5 倍载波频率之间：

$$f_{\mathrm{c}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1+L_{\mathrm{g}}}{L_1L_{\mathrm{g}}C}} \tag{12}$$

$$20f_{\mathrm{n}}\leqslant f_{\mathrm{c}}\leqslant f_{\mathrm{s}}/2 \tag{13}$$

综合上述约束条件即可确定配电网 STATCOM 输出 LCL 滤波器的参数。

3.2 设计实例

配电网电源线电压有效值 400V，STATCOM 与系统连接点相电压有效值 U_{pcc}=231V，STATCOM 额定输出补偿电流 I_{N}=100A，开关频率 f_{s}=8000Hz，STATCOM 直流侧电压 U_{dc}=700V。

由于 L_2 上基波压降较连接点电压很小，式（8）可以简化为

$$\frac{U_{\mathrm{pcc}}}{1/(\omega C)} \leqslant 0.05 I_{\mathrm{N}} \tag{14}$$

从而得到 $C \leqslant 68.9\mu\mathrm{F}$，考虑到 L_2 的影响，同时为了使滤波器具有较大的通带宽度，选择 $C=20\mu\mathrm{F}$。

根据式（7）可以得到 $L_1+L_2 \leqslant 1.47\mathrm{mH}$；一般逆变器侧开关谐波电流应被限制为额定电流的 15%～25%，本文选择开关谐波电流为额定电流的 20%，则由式（9）可得，$L_1 \geqslant 0.55\mathrm{mH}$。

将 $C=20\mu\mathrm{F}$，$f_s=8000\mathrm{Hz}$ 代入式（11），取不同的 L_g 值，可以得到经过滤波器之后开关频率处谐波电流衰减比例与 L_g 的关系，见表 1。

表 1　开关谐波电流衰减比例与 L_g 的关系

Tab.1　Relationship between attenuation ratio of switching harmonics and L_g

L_g /mH	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
i_{com}/i_{inv} (%)	65.5	24.7	15.2	11.0	8.6	7.1	6.0	5.2

由表 1 可见，当 L_g 较小时，开关谐波电流衰减不大，随着 L_g 的增加，开关谐波电流衰减比例增大，当 L_g 增加到 0.25mH 时，开关谐波电流衰减比例已足够低并且继续增加 L_g 其衰减比例变化不大，所以取 $L_g=0.25\mathrm{mH}$。结合前面得到的 $L_1+L_2 \leqslant 1.47\mathrm{mH}$，$L_1 \geqslant 0.55\mathrm{mH}$ 的条件，选择 $L_1=0.75\mathrm{mH}$。

将所设计的参数代入式（12），得到滤波器谐振频率 $f_c=2599\mathrm{Hz}$，满足式（13）中所述约束条件。

关于阻尼电阻 R 的设计，一般取电阻值为谐振频率点电容电抗的 1/3，按此计算得 $R=1.0\Omega$，但是此时阻尼系数比较低，对谐振抑制效果较差，为了增强抑制能力，本文取 $R=1.5\Omega$。

3.3　减小电阻功率损耗方法

为了降低阻尼电阻上的功率损耗，本文采用在电阻上并联一个小电感 L_R 的方法，通过 L_R 的分流作用，减小流过电阻的电流，从而减小其功率损耗。以 i_{com} 对 u_{inv} 的传递函数为例，来简要说明 L_R 对滤波器性能的影响。

由式（5）和式（6）可得，在没有并联 L_R 的时候，i_{com} 对 u_{inv} 的传递函数表示为

$$G_2(s)=\frac{i_{\mathrm{com}}(s)}{u_{\mathrm{inv}}(s)}=\frac{RCs+1}{L_1L_gCs^3+RC(L_1+L_g)s^2+(L_1+L_g)s} \tag{15}$$

电阻并联 L_R 之后，该传递函数变为

$$G_2'(s)=\frac{i_{\mathrm{com}}(s)}{u_{\mathrm{inv}}(s)}=\frac{RCL_Rs^2+L_Rs+R}{L_1L_gL_RCs^4+RC(L_1L_g+L_1L_R+L_gL_R)s^3+L_R(L_1+L_g)s^3+R(L_1+L_g)s} \tag{16}$$

在前面设计的滤波器参数基础上，取不同的 L_R 值，做该传递函数的幅频响应曲线，如图 6 所示。曲线 1：没有并联 L_R；曲线 2：$L_R=0.1\mathrm{mH}$；曲线 3：$L_R=0.2\mathrm{mH}$。

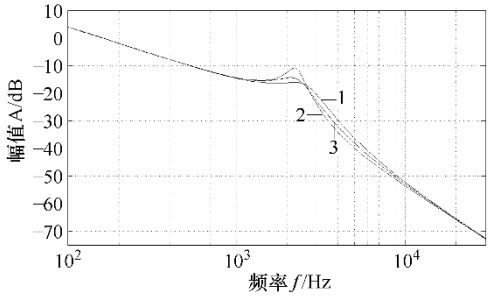


图 6　不同 L_R 取值下 $G_2(s)$ 的幅频响应曲线

Fig.6　Amplitude-frequency response curves of $G_2(s)$ with different L_R values

由图 6 可见，L_R 的引入对滤波器的谐振频率影响很小（谐振频率略微有所减小），并且 L_R 对低频段与高频段的衰减特性几乎没有影响，只是对谐振频率及其附近频段的增益产生一定影响，这种影响随着 L_R 取值的增大而减小。

由于谐振频率处谐波含量并不大，所以 L_R 的引入也不会对电流谐波畸变率造成很大影响。同时为了节省成本，没必要选择很大的 L_R，并且，小的 L_R 更有利于减小电阻功率损耗。综合考虑，选择 $L_R=0.1\mathrm{mH}$。

4　仿真验证

采用 Matlab/Simulink 软件进行仿真，按照图 1 建立仿真电路系统，采用阻感并联电路作为无功负载，采用三相不可控整流桥作为少量谐波负载。系统具体参数见表 2。

表 2　仿真系统各元件参数

Tab.2　Parameters of the components in simulation system

元 件	参数值
电源及线路阻抗	0.8Ω/19mH
变压器电压比	10kV/0.4kV
负载电阻/Ω	4
负载电感/mH	14
整流桥负载/Ω	25
载波频率/Hz	8000

LCL 滤波器参数由前文设计为： L_1=0.75mH，C=20μF，R=1.5Ω，L_2=0.2mH，L_R=0.1mH。

系统控制方法采用基于 abc/dq 变换的无功与谐波综合补偿方法，控制算法原理图如图 7 所示。

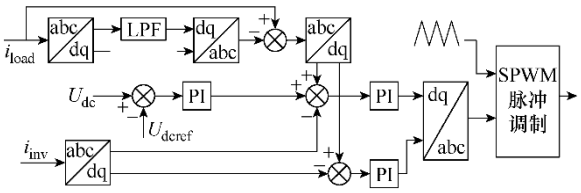
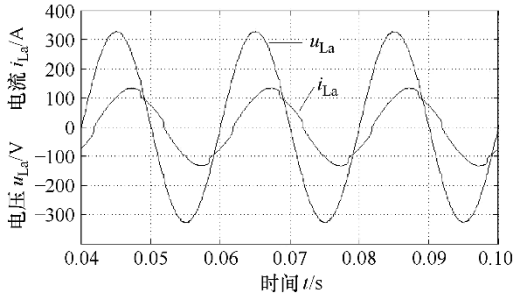


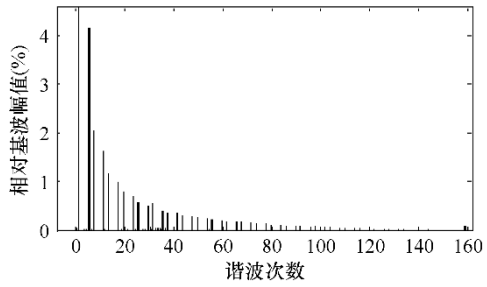
图 7 控制算法原理框图

Fig.7 Block diagram of control algorithm

仿真结果如图 8 和图 9 所示，图 8 为负载波形与频谱，图 9 为 400V 电网波形与频谱。



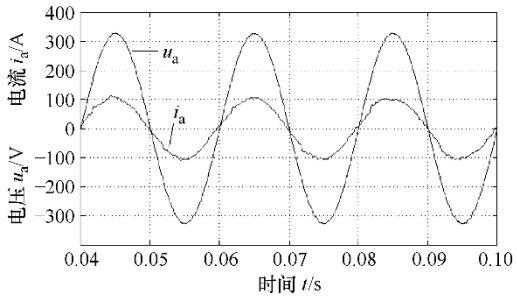
(a) 负载 A 相电压和电流波形



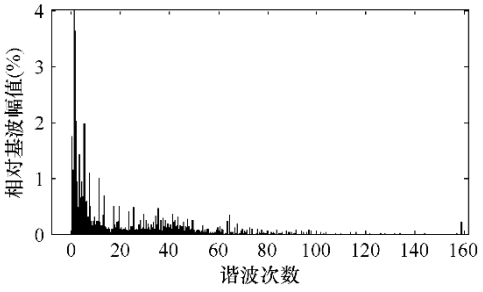
(b) 负载 A 相电流频谱

图 8 负载电压和电流波形及电流频谱

Fig.8 Phase A voltage/current waveforms and current spectrum of load



(a) 电网 A 相电压和电流波形



(b) 电网 A 相电流频谱

图 9 电网电压和电流波形及电流频谱

Fig.9 Phase A voltage/current waveforms and current spectrum of the 400V grid

仿真结果显示：负载电流滞后电压 35.7°，并且负载电流中含有一定量的谐波， THD 约为 4.83%；经过 D-STATCOM 补偿后，电网电流与电压基本同相位，且电网电流中谐波含量减小， THD 约为 3.52%，波形光滑。可见，本文设计的 LCL 滤波器参数具有很好的滤波效果，既有效地滤除了开关频率谐波，同时也具有一定的通带宽度，使得 D-STATCOM 能够补偿一些低次谐波。

同时，仿真数据显示：滤波电容上流过的基波电流约为 2.95A，而阻尼电阻上基波电流不到 0.1A，表明阻尼电阻并联的小电感对降低滤波器功率损耗起到了积极的作用。

5 结论

本文指出 LCL 滤波器在结构上与 LC 滤波器是可以等效的，但比 LC 滤波器具有更好的滤波性能。主要从电感基波压降、 STATCOM 无功调节能力、开关谐波电流衰减度等方面深入研究分析了 LCL 滤波器的特性，提出滤波器参数设计的约束条件，为了使 D-STATCOM 能够补偿一定的谐波，本文所设计滤波器具有较大的通带宽度。另外，通过研究分析，本文指出在滤波器阻尼电阻上并联小

电感对滤波器性能的影响很小，但可以通过电感的分流作用，大大减小滤波器的功率损耗。通过仿真验证，表明所设计 LCL 滤波器参数具有很好的效果。本文提出的 LCL 滤波器参数设计方法简单可行，对于理论研究与实际应用均具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现 [M]. 北京: 中国电力出版社 , 2005.

[2] 荣飞, 罗安, 范卿. 应用于不平衡系统的 STATCOM 电压控制新方法 [J]. 电工技术学报 , 2010, 25(3): 138-143.
Rong Fei, Luo An, Fan Qing. A novel voltage control method applied in STATCOM under unbalanced system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 138-143.

[3] Weineng Chang, Jinghuan Liau. Development of a cascaded multilevel DSTATCOM for real-time load power factor correction[C]. Proceedings of the IEEE International Power Engineering Conference 2010, Sapporo, 2010: 2037-2042.

[4] Singh B, Adya A, Mittal A P, et al. Modeling, design and analysis of different controllers for D-STATCOM[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on physics Science and Technology 2008, New Delhi, 2008: 1-8.

[5] Mitra P, Venayagamoorthy G K. An adaptive control strategy for D-STATCOM applications in an electric ship power system[J]. IEEE Power Electronics, 2010, 25(1): 95-104.

[6] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社 , 2005.

[7] 孙蔚, 伍小杰, 戴鹏, 等. 基于 LCL 滤波器的电压源型 PWM 整流器控制策略综述 [J]. 电工技术学报 , 2008, 23(1): 90-96.
Sun Wei, Wu Xiaojie, Dai Peng, et al. An overview of current control strategy for three-phase voltage-source rectifier with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 90-96.

[8] 荣飞, 罗安, 汤赐, 等. STATCOM 输出滤波器结构设计及参数优化 [J]. 电工技术学报 , 2008, 23(4): 137-142.
Rong Fei, Luo An, Tang Ci, et al. Structure design of output filter in STATCOM and its parameter optimization[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2008, 23(4): 137-142.

[9] 武键, 徐殿国, 何娜. 并联有源滤波器输出 LCL 滤波器研究 [J]. 电力自动化设备 , 2007, 27(1): 17-20.
Wu Jian, Xu Dianguo, He Na. Research on LCL filter applied to shunt active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 17-20.

[10] Wang Cunping, Yin Xianggen, Wen Minghao, et al. Structure and parameters design of output LC filter in D-STATCOM[C]. Proceedings of the IEEE Powercon 2010, Hangzhou, China, 2010: 1-6.

[11] Wang T CY, Ye Zhihong, Sinha G, et al. Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter[C]. Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference 2003, Acapulco, Mexico, 2003: 779-784.

作者简介:王存平　男，1986 年生，博士研究生，研究方向为电力电子技术在电力工程中的应用。 尹项根　男，1954 年生，教授，博士生导师，主要研究领域为电力系统继电保护与安全稳定控制，信息、光电、电力电子技术及其在电力工程中的应用等。