

三电平逆变器电流纹波分析和LCL滤波器设计

王付胜, 邵章平, 刘萍
(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要:分析三电平逆变器并网运行时的电流瞬态过程,求得纹波电流的最大脉动。分析了LCL滤波器的滤波原理,证明在相同的滤波效果下,LCL滤波器的总电感约为L滤波器电感的1/3。根据功率条件和纹波抑制要求,确定L型滤波器的电感量,从而确定LCL型滤波器的总电感。在满足滤波要求前提下,使桥臂电流谐波含量尽可能低,从而确定电感比和滤波电容。仿真和实验证明了所提设计方法的可行性。

关键词:三电平逆变器;滤波器;电感比;电流谐波

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2010)11-0036-03

Analysis of Current Ripple of Three-level Grid Connected Converter and Design of LCL Filter

WANG Fu-sheng, SHAO Zhang-ping, LIU Ping
(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:The maximum ripple current is given through analysis of the current transient process.The principle of LCL filter is analyzed,and it is proved that the inductance of LCL filter is equal to one third of that of L filter in the situation of the same effect.According to power condition and ripple rejection,inductance of L filter is determined,so as to inductance of LCL filter.While satisfying the filter effect,converter current harmonic is reduced as low as possible to determine inductance ratio and capacitance.The simulation and experiment testify this design scheme is feasible.

Keywords:three level converter; filter; inductance ratio; current harmonic

1 引言

三电平并网逆变器耐压等级高、 du/dt 低、输出波形谐波含量低,是高电压大功率场合的应用趋势。在滤波器的选择上,考虑三电平并网逆变器的应用特点,滤波器体积、造价等问题,采用LCL滤波器。该滤波器设计的第一步是对电感总量的选取。已有相关文献介绍了基于两电平的总电感的设计,即根据功率条件设计电感上限,根据纹波抑制要求设计电感下限,但目前尚无三电平电流纹波的推导方法。

在此分析了三电平逆变器并网运行时的电流瞬态过程,求得纹波电流的最大值,为下一步设计奠定基础。论证了在相同的滤波效果下,LCL滤波器的总电感仅为L滤波器电感的1/3,故先对L滤波器进行设计,以此作为选择总电感的依据,然后在满足网侧电流谐波要求的前提下,选择适当的电感比和电容,使得桥臂侧的电流谐波含量尽可能低。最后建立了Matlab仿真模型,并搭建了

一套基于DSP-CPLD为控制核心的实验平台,验证了所提三电平并网逆变器LCL滤波器设计方法的可行性。

2 三电平并网逆变器纹波电流分析

图1示出三电平变流器主电路拓扑。

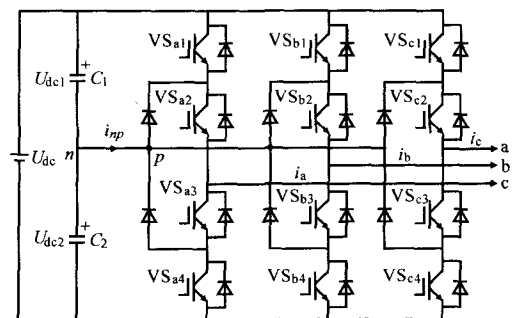


图1 三电平变流器主电路拓扑图

定义 s_k ($k=a, b, c$) 为三电平逆变器桥臂开关函数,即:

$$s_k = \begin{cases} 1, & VS_{k1}, VS_{k2} \text{ 导通} \\ 0.5, & VS_{k2}, VS_{k3} \text{ 导通} \\ 0, & VS_{k3}, VS_{k4} \text{ 导通} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $VS_{k1} \sim VS_{k4}$ 为 k 相桥臂的 4 个开关。

定稿日期:2010-10-09

作者简介:王付胜(1976-),男,安徽池州人,讲师,研究方向为电机拖动及新能源。

以 a 相负半周为例, 当采用 L 滤波器时, 设 VS_{a2} 在一个开关周期 T_s 内导通时间为 T_{on} , 关断时间为 T_{off} 。因为纹波电流在正弦波电流峰值处最严重^[1], 考虑电流峰值处一个 T_s 内的电流瞬态过程, 其波形如图 2 所示。

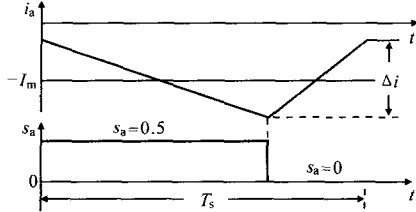


图 2 一个开关周期的电流瞬态过程

稳态条件下, 当 $0 \leq t \leq T_{on}$ 时, $s_a=0.5$, 且有:

$$L_T \frac{\Delta i}{T_{on}} - E_m + \frac{U_{dc}}{3} \left(\frac{1}{2} + s_b + s_c \right) = 0 \quad (2)$$

式中: L_T 为 L 滤波器的电感; Δi 为正弦波峰值处的电流纹波; E_m 为电网相电压峰值; U_{dc} 为直流侧总电压。

当 $T_{on} \leq t \leq T_s$ 时, $s_a=0$, 且有:

$$-L_T \frac{\Delta i}{T_{off}} - E_m + \frac{U_{dc}}{3} (s_b + s_c) = -\frac{U_{dc}}{2} \quad (3)$$

综合式(2), (3)可得:

$$L_T \frac{\Delta i}{T_s} = \left[E_m - \frac{U_{dc}}{3} \left(\frac{1}{2} + s_b + s_c \right) \right] \frac{-E_m + U_{dc} (3/2 + s_b + s_c)}{U_{dc}} - 3U_{dc} \left(a - \frac{1}{6} \right)^2 + \frac{U_{dc}}{12} \quad (4)$$

式中: $a = E_m/U_{dc} - 1/6 - (s_b + s_c)/3$ 。

通常取 $E_m/U_{dc} \approx 1/2$, 所以当 $s_b + s_c = 1/2$ 时, 纹波电流取最大值。

3 三电平并网逆变器 L 滤波器的设计

L 滤波器设计首先要满足逆变器输出功率的要求。三电平并网逆变器工作在单位功率因数时对电感的约束条件是^[2]:

$$L_T \leq \frac{\sqrt{U_{dc}^2 - 4E_m^2}}{2I_m \omega_f} \quad (5)$$

其次, 选择电感的关键是满足电流纹波的抑制要求, 因为纹波过大会影响器件损耗和控制策略的实施。工程上纹波电流最大值为额定电流峰值的 10%^[3], 即 $\Delta I_{max} \leq 10\% I_m$, 将其代入 $\Delta I_{max} = U_{dc}/(12L_T f_s)$, 可得满足谐波抑制要求的电感范围:

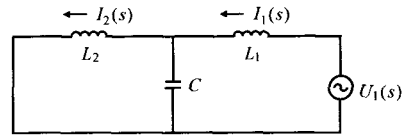
$$L_T \geq \frac{5U_{dc} T_s}{6I_m} \quad (6)$$

4 三电平并网逆变器 LCL 滤波器设计

4.1 LCL 滤波器总电感的确定

鉴于 PWM 波中不含有低次谐波, 仅考虑谐波

时, 电网电压相当于短路, 以 a 相为例, LCL 滤波器可以等效成图 3 所示的谐波模型。



$U_1(s)$ 为 a 相桥臂侧谐波电压
 L_1, L_2 为 a 相桥臂侧电感和网侧电感
 $I_1(s), I_2(s)$ 为 a 相桥臂侧和网侧谐波电流

图 3 LCL 滤波器谐波模型

根据 LCL 滤波器的谐波模型, 则有:

$$\frac{I_2(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} = \frac{1}{(L_1 + L_2) s} \cdot \frac{1}{1 + (s/\omega_{res})^2} \quad (7)$$

式中: ω_{res} 为 LCL 滤波器谐振角频率。

为避免在谐振频谱的高端和低端产生谐振现象, 通常使谐振角频率满足 $10\omega_f \leq \omega_{res} \leq 0.5\omega_s$, 其中 ω_f, ω_s 分别为基波角频率和开关角频率。

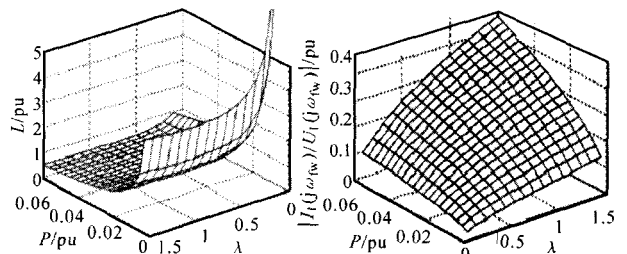
由于输出谐波能量主要集中在开关频率附近, 所以设计主要考察对开关频率处谐波的衰减。将 $10\omega_f \leq \omega_{res} \leq 0.5\omega_s$ 代入式(7)中, 可得:

$$\left| \frac{I_2(s)}{U_1(s)} \right|_{s=j\omega_s} \leq \frac{1}{3(L_1 + L_2)\omega_s} \quad (8)$$

由式(8)可见, 在不考虑谐振的情况下, 在相同的滤波效果下, LCL 滤波器的总电感约为 L 滤波器电感的 1/3, 即 $L_1 + L_2 \approx L_T/3$, 但考虑到 LCL 滤波器谐振的影响, 总电感应选择稍大一些。

4.2 电感比和滤波电容的选择

定义电感比 $\lambda = L_2/L_1$ 。由于采用 LCL 滤波器时, 除满足网侧电流谐波的标准外, 还应使电容吸收的无功功率和桥臂电流谐波尽可能小, 并且使谐振频率满足一定的要求^[4]。为此, 在以下分析中着重考察不同电感比和滤波电容对总电感、桥臂电流谐波的影响, 如图 4 所示。图中功率的基准为 S_n , 电压的基准为电网相电压有效值 E , 电感基准为 $L_b = E^2/(S_n \omega_f)$, 电容基准为 $C_b = 1/(3L_b \omega_f^2)$ 。



(a) 电容和电感对总电感影响 (b) 电容和电感比对桥臂电流谐波影响

图 4 电容和电感比对总电感及桥臂电流谐波影响

由图 4a 可见,随着电容 C 的增大,LCL 滤波器的总电感量 L 会降低,并且当 C 增大到一定值后, L 的减小趋于平缓,并且当网侧电感具有一定值后,其 λ 对 L 的影响也较小。

由图 4b 可见,随着 C 的增加,桥臂电流谐波增加,而对相同的电容而言,网侧电感所占比重越大,桥臂电流谐波含量也就越大。

分析图 4 不难发现, C 在 $0.1\mu\text{F}\sim 0.15\mu\text{F}$ 之间,而 λ 在 $0.5\sim 1$ 之间时, L 的变化非常平缓,即在这一区域内改变参数组合对 L 的减小作用甚微,而在这一区域内,随着 C 和 λ 的增加,桥臂电流谐波的增加速度较大。所以, C 和 λ 需要选取这一区域的下限值,即:

$$C=0.1C_b=\frac{S_n}{30E^2\omega_i}, \quad \lambda=0.5 \quad (9)$$

4.3 校验和阻尼电阻的选择

由 $L_1+L_2\approx L_T/3$ 和式(9)初步得出桥臂侧电感、滤波电容和网侧电感,检验得出的谐振频率是否满足 $10\omega_i\leq\omega_{res}\leq 0.5\omega_s$ 。如果不满足条件,则再次重新选择电容和电感比,得到新的 L_1, C 和 L_2 值,直至满足要求。

以上校正完成后,进行最后的设计环节,即设计阻尼电阻。由求得的谐振频率求出在谐振点的电容阻抗为:

$$X_c=(\omega_{res}C)^{-1} \quad (10)$$

阻尼电阻取谐振点电容阻抗的 1/3。

5 算例、仿真和实验

以 10 kVA 三电平并网逆变器 LCL 滤波器为例,说明三电平 LCL 滤波器的设计方法。电网线电压有效值 380 V,并网变压器变比 380 V/190 V,直流侧电压为 330 V,采用 SPWM 控制,开关频率 2 kHz,网侧电流峰值为 40 A。

(1)满足并网要求的滤波器 L 范围由式(5),(6)得出, $3.43\text{ mH}\leq L_T\leq 4.5\text{ mH}$,取 $L_T=3.6\text{ mH}$,故 LCL 滤波器的 $L=1.2\text{ mH}$,实际中 $L=1.5\text{ mH}$;

(2)由式(9)可得,LCL 滤波器的 $C=87\ \mu\text{F}$, $\lambda=0.5$,则桥臂侧电感 $L_1=1\text{ mH}$,网侧电感 $L_2=0.5\text{ mH}$;

(3)此时 LCL 滤波器的谐振频率为 920 Hz,满足要求,进一步求得阻尼电阻为 $0.65\ \Omega$ 。

为验证所提三电平并网逆变器 LCL 滤波器设计方法的正确性,建立了 Matlab 仿真模型,并搭建了一套基于 DSP-CPLD 为控制核心的实验平台,采用无源阻尼控制方案,图 5,6 分别为 a 相网

侧电流波形、谐波频谱的仿真及实验波形。 i_a 的 THD 分别为 2.88%和 3%,符合并网要求,实验结果与仿真结果一致。

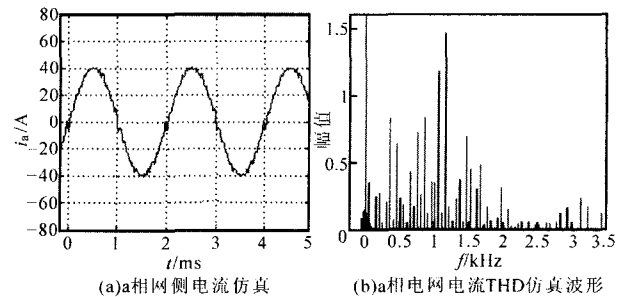


图 5 a 相网侧电流与 THD 仿真波形

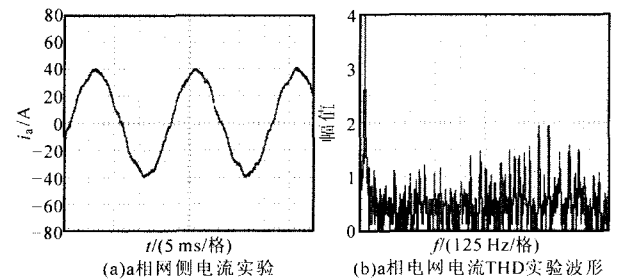


图 6 a 相网侧电流与 THD 实验波形

6 结论

首先根据三电平并网逆变器电流瞬态过程,求得纹波电流脉动的最大值,然后根据功率条件和纹波抑制要求,设计 L 型滤波器。分析 LCL 滤波器的滤波原理,证明了在相同滤波效果下,LCL 滤波器的总电感仅为 L 滤波器电感的 1/3,以此来作为 LCL 滤波器总电感的设计依据。然后,在满足滤波要求的前提下使桥臂电流谐波含量尽可能低,从而确定电感比和滤波电容。仿真和实验证明了所提设计方法的可行性。

参考文献

- [1] 张宪平.三相电压型整流器的 LCL 型滤波器分析与设计[J].电气应用,2007,26(5):65-68.
- [2] 张崇巍,张兴.PWM 整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [3] M Liserre, F Blaabjerg, S Hansen.Design and Control of a LCL-filter-based Three-phase Active rectifier[J].IEEE Trans. on Industry Applications,2005,41(9-10):1281-1290.
- [4] Y Lang, D Xu, S R Hadianamrei, et al.A Novel Design Method of LCL Type Utility Interface for Three-phase-voltage Source Rectifier[A].in Proc.of 36th IEEE PESC[C].2005:313-317.