

## 20 kW 三电平并网变流器主电路参数的设计

易映萍<sup>1</sup>, 刘刚<sup>2</sup>, 胡四全<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 许继柔性输电有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 提出了采用三电平并网技术研制可再生能源发电高压并网变流器, 介绍了三电平并网变流器主电路的拓扑结构, 并对其主电路参数的选择进行了研究, 给出了主电路功率器件 IGBT、箝位二极管和直流侧电容的设计方法。采用 LCL 滤波器抑制注入电网谐波, 并对其工作原理和滤波特性进行了分析, 建立了 LCL 滤波器设计的数学模型。在此基础上, 设计出了 20 kW 三电平并网变流器的实验样机, 实验结果表明所提出的设计方法正确实用。

**关键词:** 三电平; 并网变流器; 主电路; IGBT; 滤波器

### Design of main circuit parameters for 20 kW three-level grid-connected converter

YI Ying-ping<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, HU Si-quan<sup>2</sup>

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Xuji Flexible Transmission System Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** This paper presents that using three-level grid-connected technology to study renewable energy generation high-voltage grid-connected converter, introduces the topological structure of main circuit of three-level grid-connected converter, and studies the parameters selection of main circuit. The design methods of the IGBT, clamped diode and DC bus capacitor in the main circuit are given. The paper uses LCL filter to restrain the harmonics injected into power system, and analyses the principle and filter characteristics and builds the mathematic model of the LCL filter. On these basis, experimental circuit of 20 kW three-level grid-connected converter is designed, and experimental results prove the correctness and practicability of the design method.

**Key words:** three-level; grid-connected converter; main circuit; IGBT; filter

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0193-03

## 0 引言

本文所研制的三电平并网变流器交流侧接 380 V 三相交流电网, 直流侧能量通过并网变流器后经滤波器后送入电网。三电平并网变流器电路拓扑结构如图 1 所示<sup>[1-3]</sup>, 直流侧电容  $C_1$ ,  $C_2$  提供直流支撑电压, 抑制直流电压波动; 功率开关管  $S_1 \sim S_{12}$ ,  $D_1 \sim D_6$  实现了能量的变换和流动, 是交流侧与直流侧的纽带; 滤波器  $L_1$ ,  $C$ ,  $L_2$  主要滤除并入电网的高次谐波电流, 减小对电网的谐波污染。

三电平并网变流器主要技术参数如下: (1) 桥臂数量: 6 个; (2) 额定功率: 20 kW; (3) 交流电压适应范围: AC380 V ( $1 \pm 10\%$ ); (4) 交流额定电流: 30 A; (5) 开关频率: 8 kHz; (6) 额定直流母

线电压: 620 V (考虑直流电压利用率为 90%, 最高交流电压, 线路电压损耗和死区忽略不计)。

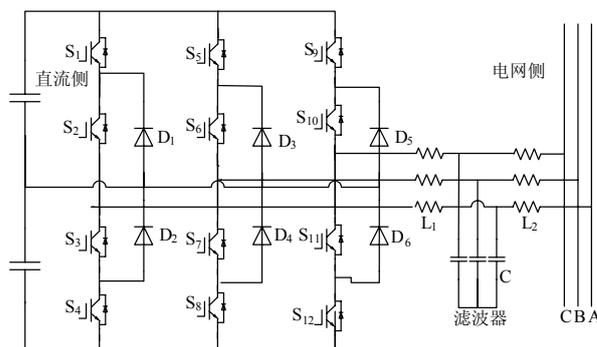


图 1 三电平并网变流器电路拓扑结构

Fig.1 Topology of three-level grid-connected converter

三电平并网变流器主电路参数的设计主要包括功率器件 IGBT、箝位二极管、PWM 滤波器和直流

**基金项目:** 国家科技支撑项目 (2007BAA12B04); 上海市教委科研创新项目 (08YZ101)

电容等器件参数的设计和选取<sup>[4]</sup>。

### 1 IGBT (T<sub>1</sub>~T<sub>12</sub>) 的选择

IGBT 的选择主要有三方面需要考虑: 额定电压、额定电流和开关速度。因为直流母线电压的有效值为:

$$V_{dc} = \frac{380V}{0.9M} \approx 444 V \quad (1)$$

其中,  $M$  为调制度, 正常工作时取  $M = 0.95$ 。直流母线电压利用率为 90%, 得到直流母线电压的峰值近似为 620 V, 根据三电平电路的特性, IGBT 正常工作时承受的电压为直流母线电压的一半, 即 310 V。

所设计系统额定容量为 20 kW, 因此额定电流

$$I_{rms} = \frac{20000}{\sqrt{3}U_{l-l}} = 30 A \quad (2)$$

因此流过 IGBT 额定峰值电流近似为 43 A。

小于 1 000 V 的 IGBT 主要规格有 600 V/50 A、600 V/75 A、600 V/100 A、600 V/150 A。综合考虑, 600 V/100 A 电压电流等级的开关管比较合适。最后确定具体型号如下: BSM100GB60DLC (英飞凌), 主要技术参数为:  $V_{CES} = 600 V$ ,  $I_{C,nom} = 100 A$ 。

### 2 箝位二极管 (D<sub>1</sub>~D<sub>6</sub>) 的选择

箝位二极管的选择应根据 IGBT 的最大通态电流和最大负载电流来考虑, 一般情况下负载电流不能超过 IGBT 所允许的电流, 因此选择二极管的通态电流与 IGBT 相接近。具体选择型号: MEE 95-06DA (IXYS) 主要技术参数为:  $V_{RRM} = 600 V$ ,  $I_{FAV} = 95 A$ ,  $t_{rr} = 250 ns$ 。

### 3 LCL 滤波参数设计

网侧变流器系统设计中, 交流侧滤波器的设计十分重要, 它的取值不仅影响系统动、静态性能, 还制约着逆变器的输出功率、功率因数和直流侧电压。LCL 滤波器的原理图如图 2 所示。

LCL 的设计方法分为两步<sup>[5]</sup>: 首先根据电感的

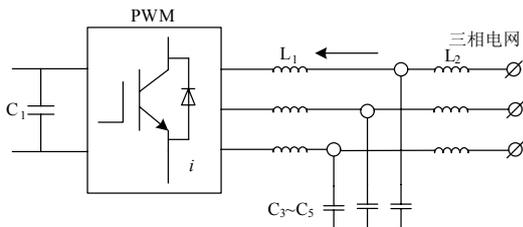


图 2 LCL 滤波器原理图

Fig.2 Principle figure of LCL filter

允许电压降确定电感的上限值, 然后依据电路中的纹波电流指标进而确定电感的下限值, 根据计算结果综合考虑参数的选取。在具体设计 LCL 滤波器时, 可将逆变器视为一个含开关频率成分的高频谱波源, 该频率成分经 LCL 后将会受到很大的衰减, 最终只有很小一部分注入电网。由于注入电网的谐波频率要远高于电网频率, 其对电网相当于短路, 因此在设计滤波器时可忽略电网的作用。为方便滤波器设计, 将三电平变流器等效为工作在开关频率处的一半波 buck 电路, 如图 3 所示。

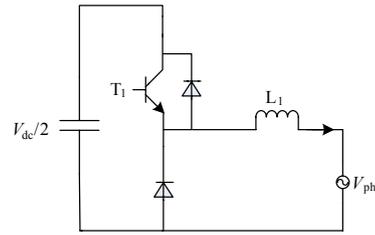


图 3 NPC 简化电路

Fig.3 Simplification circuit of NPC

#### (1) L<sub>1</sub> 设计

由磁性元件的伏秒平衡原理可得逆变器侧电感纹波电流峰峰值:

$$\Delta I_{LMAX} = \frac{V_{dc} - V_{ph}}{2L_1} \times \frac{D}{f_{sw}} \quad (3)$$

其中:  $L_1$  为逆变器侧滤波电感;  $f_{sw}$  为逆变器开关频率;  $D$  为逆变器每一相对直流侧电容中点占空比;  $V_{ph}$  为单相电压。

由极大值原理可知, 当  $|D| = 0.5$  时, 式 (3) 取得极大值。将  $V_{dc} = 620 V$ ,  $f_{sw} = 8 K$ ,  $\Delta I_{LMAX} = 43 A \times 10\%$  代入式 (3) 得到变流器侧电感值为:

$$L_1 = \frac{V_{dc}}{16f_{sw}\Delta I_{LMAX}} = 1.2 mH \quad (4)$$

#### (2) C 设计

在电网电压有效值  $V_1 = 380 V$ , 输出有功功率  $P_o = 20 kW$  的条件下, 系统阻抗为:

$$Z_b = \frac{V_1^2}{P_o} = \frac{380^2}{20000} = 7.22 \Omega \quad (5)$$

电容基准值为:

$$C_b = \frac{1}{\omega_n Z_b} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 7.22} = 440 \mu F \quad (6)$$

设在额定条件下, 电容吸收的无功功率为 5%

的额定功率,则按星型连接单相滤波电容值为  $C_f = xC_b = 0.05 \times 440 = 22 \mu\text{F}$ , 由于实际装置中滤波器为三角形连接,则通过星型和三角型的转换,滤波电容采用三角形连接时应满足

$$C < 5\% \times \frac{20000}{3 \times 2\pi f \times 380^2} = 7.35 \mu\text{F} \quad (7)$$

### (3) $L_2$ 设计

网侧电感可对逆变器输出电流中的高频成分进一步衰减,设经变流器流入到  $L_1$  的电流  $i_{inv}$ , 流入电网电流为  $i_g$ , 可得纹波电流在开关频率处的衰减系数:

$$\frac{i_g(w_{sw})}{i_{inv}(w_{sw})} = \frac{1}{1 + r(1 - w_{sw}^2 L_1 C_f)} \quad (8)$$

式中:  $L_1 = rL_2$ , 根据电流纹波衰减与  $r$  的函数关系,取  $r = 0.5$ , 此时

$$L_2 \approx 0.6 \text{ mH}$$

最后根据计算结果,可适当做些调整,实际参数选择如下:

$$L_1 = 1 \text{ mH} / 30 \text{ A}, C = 10 \mu\text{F} / 400 \text{ V},$$

$$L_2 = 0.5 \text{ mH} / 30 \text{ A}$$

对以上所设计的滤波参数在 Matlab/Simulink 里做了相关仿真,得到了 LCL 开环频率波特图,谐振频率为:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(L_1 + L_2)}{L_1 L_2 C}} = 2758 \text{ Hz}, \text{ 在}$$

$10f \sim 0.5f_{sw}$  之间,远离工频开关频率,且对中高频谐波有明显衰减,符合系统要求。

## 4 直流侧电容选取

### 4.1 电容的容量选择

直流侧电容主要有以下作用:缓冲 PWM 并网变流器交流侧与直流侧间的能量交换,稳定直流侧电压;抑制直流侧谐波电压;构成电压型的变换器。

一般而言,从满足电压环控制的跟随性指标看,并网变流器直流侧电容应尽量小,以确保直流侧电压的快速跟踪控制;而从满足电压环控制的抗扰动性指标分析,直流侧电容应尽可能的大,以限制直流电压的动态降落。因此,直流电容参数的设计,直接关系到直流电压的波动大小。

从电容容量来考虑,电容值容量大有利于直流母线电压的稳定,对系统波动有一定的抵抗能力,但容量大则意味着体积大、成本高、跟踪速度慢、安装不方便;电容小,则体积小、价格便宜、跟踪速度快,但不利于系统的稳定。

#### (1) 按照系统满足跟随性能指标设计

$$I_{\text{RMAX-e}} = \frac{\sqrt{2}P_e(1+10\%)}{\eta \times (\sqrt{3}U_{in})} \quad (9)$$

式中:  $P_e(1+10\%)$  指系统传送有功波动 10% 的情况下,电网电压将跌落 90% ( $\eta = 90\%$ ) 的情况下,系统流过的交流电流最大为 53 A。

$$C_{dc} \geq \frac{\Delta I_{dc-\max} \times \frac{1}{2}}{2f_{sw} \times \Delta V_{dc-\max}} \quad (10)$$

式中:  $\Delta I_{dc-\max}$  等于交流最大峰值电流 53 A;  $f_{sw} = 8 \text{ k}$ ;  $\Delta V_{dc-\max} = 5\% \times 620 = 31 \text{ V}$ 。

由此得到  $C_{dc} \geq 535 \mu\text{F}$

#### (2) 按照系统满足稳定性能指标设计

$$C_{dc} = \frac{P_E}{2\omega V_{dc} \Delta V_{dc}} = \frac{200000}{2 \times 100 \times 3.14 \times 620 \times 620 \times 5\%} = 1656 \mu\text{F} \quad (11)$$

不论按照快速性还是跟随性指标对电容进行设计,考虑到电容的等效电阻在电容充放电过程中的发热问题,其等效电阻应尽可能小,应满足公式

$$R_{\text{ESR}} \leq \frac{\Delta V_{dc-\max}}{\Delta I_{\text{RMAX-e}}} \quad (12)$$

### 4.2 电容的电压等级选择

由于网侧逆变器控制策略拟采用把直流母线电压稳定在 620 V 的控制策略,因此直流母线电容的电压等级必须大于 620 V,采用两个耐压 450 V 的电解电容串联构成。

实际选型: 450 V/4 700  $\mu\text{F}$  或 450 V/6 800  $\mu\text{F}$ , 为了方便调试,可选择两个 6 800  $\mu\text{F}$  串联,等效电容为 3 400  $\mu\text{F}$ 。

## 5 结论

二极管箝位型三电平并网变流器作为解决高压并网的一种有效途径,具有很多技术优点和广阔的应用前景。三电平并网变流器可以实现高功率因数运行,在运行过程中可以保证直流母线电压及中点电压的恒定,并有较高的稳态精度和抗干扰特性。本文主要对 20 kW 三电平并网变流器主电路中的功率器件 IGBT、箝位二极管、PWM 滤波器和直流电容的参数进行了设计,实验验证了参数的可行性。该变流器的设计也为以后设计大功率工程化样机或实验奠定了基础,提供了参考。

(下转第 200 页 continued on page 200)

