

# A题：级联型H桥变换器的阶梯波特定消谐技术研究

在高压、大功率场合，级联型多电平变换器得到了越来越多的应用。级联型多电平变换器由若干个变换器模块单元串联而成以实现高电压、多电平的输出，其基本系统结构如图1所示，变换器模块单元常采用3电平输出为的H桥变换器单元，其中电感 $L$ 起滤波作用。

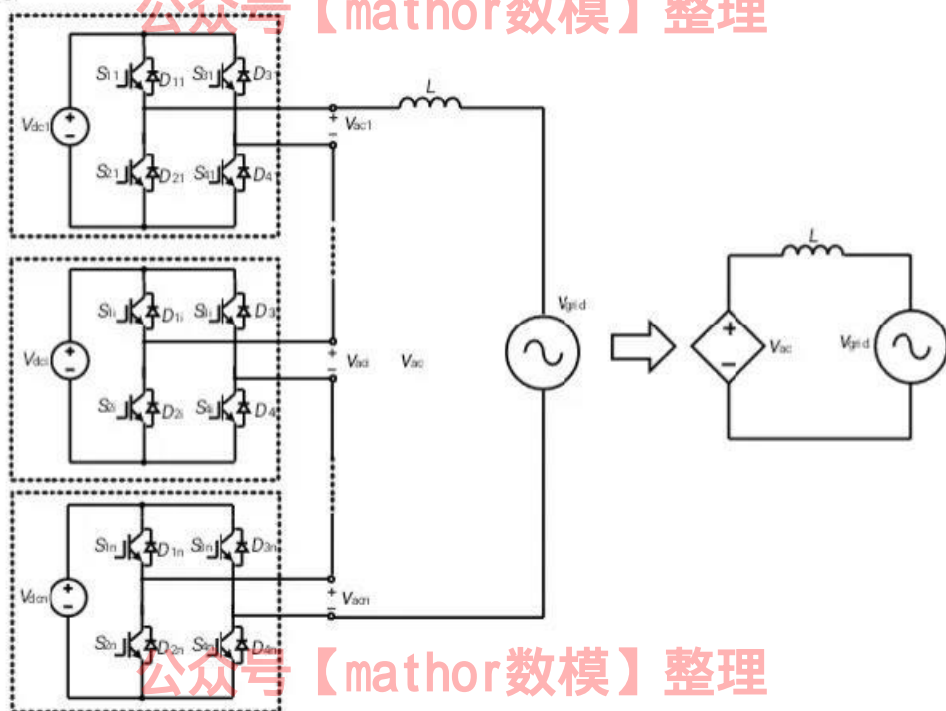


图1 基于级联H桥变换器的并网系统结构及等效电路

特定谐波消除脉宽调制技术（Selected Harmonic Elimination Pulse Width Modulation, SHEPWM）通过选择特定的开关时刻，在满足期望的输出基波电压 $v_{ac}$ 的同时，来消除选定的低次谐波，进而改善输出电压的波形质量。由于级联型多电平变换器输出电压 $v_{ac}$ 是各H桥变换器单元输出电压 $v_{aci}$ 的叠加，电平数的增加可使输出的阶梯形电压更加接近正弦波，进一步减少谐波含量。

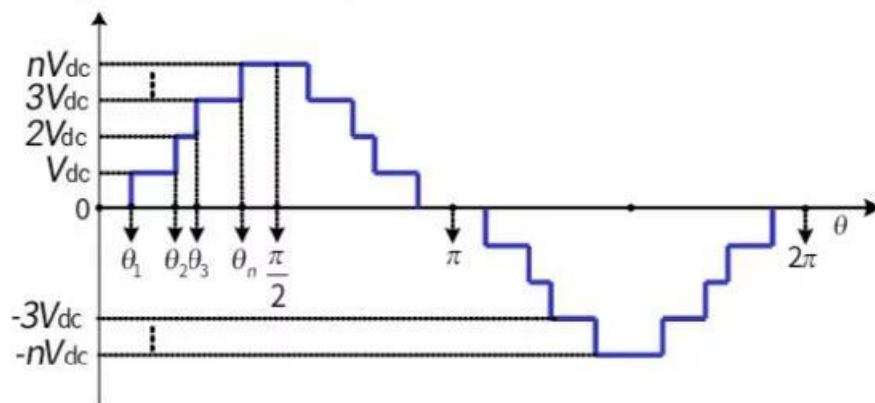


图2 基于阶梯波SHEPWM控制的 $v_{ac}$ 输出电压波形

在级联型H桥变换器系统中，对于第 $i$ 个H桥变换器单元，当 $(S_{1i}, S_{3i})$ 或 $(S_{2i}, S_{4i})$ 开通时输出0电平，即输出电压 $v_{aci}$ 为0；当 $(S_{1i}, S_{4i})$ 开通时输出1电平，即输出电压 $v_{aci}$ 为 $V_{dci}$ ；当 $(S_{2i}, S_{3i})$ 开通时输出-1电平，即输出电压 $v_{aci}$ 为 $-V_{dci}$ ；对于级联型H桥变换器整体输出电平数可为 $(2n+1)$ 。

当H桥变换器单元直流侧独立电压 $V_{dci}$ 都为 $V_{dc}$ 时，可输出 $(2n+1)$ 电平数的阶梯型电压 $v_{ac}$ 如图2所示，单个H桥变换器的输出波形总是具有半波奇对称性和1/4对称

性, 通过对该波形进行傅里叶级数分解, 对于  $v_{ac}$  的第  $s$  个奇数次谐波的幅值可表示为式 (1) :

$$V_s = \frac{4V_{dc}}{s\pi} \sum_{s=1,3,5,\dots}^{\infty} [\cos(s\theta_1) + \cos(s\theta_2) + \dots + \cos(s\theta_n)] \quad (1)$$

其中:  $0 \leq \theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_n \leq \frac{\pi}{2}$ 。

对于  $n$  个 H 桥变换器单元的级联型变换器系统, 在满足期望基波电压幅值的条件下可消去特定谐波的数量为  $(n-1)$ , 试找出一组  $\theta_i$  ( $i=1, \dots, n$ ), 使输出电压的基波分量幅值为  $V_{1m}$ , 且不含有低次谐波 (对称三相系统中不考虑 3 的倍数次谐波)。

定义调制比幅值  $m = V_{1m}/(nV_{dc})$ , 根据上述约束条件可写出关于  $\theta_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 的非线性代数方程组式 (2)。

$$\begin{cases} \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(\theta_n) = \frac{\pi V_{1m}}{4V_{dc}} = \frac{\pi n}{4} m \\ \cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \dots + \cos(5\theta_n) = 0 \\ \cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \dots + \cos(7\theta_n) = 0 \\ \dots \dots \dots \end{cases} \quad (2)$$

对于特定的级联模块数  $n$ , 调制比  $m$  在一定范围内取值才能使非线性方程组有解。并且求解方程组需要一组初值  $\theta^0$  ( $i=1, \dots, n$ ), 初值选取对方程组求解收敛性有直接影响。

同时基于阶梯波特定消谐技术的输出电压  $v_{ac}$  波形质量, 可通过总电压谐波畸变率 (Total Harmonics Distortion, THD) 来描述, 如式 (3)。

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{\substack{i=6k\pm1 \\ k=1,2,3,\dots}}^{\infty} V_i^2}{V_1^2}} \times 100\% = \sqrt{\frac{V_5^2 + V_7^2 + V_{11}^2 + \dots + V_{43}^2 + \dots}{V_1^2}} \times 100\% \quad (3)$$

问题:

(1) 当  $n=3$ ,  $m=0.8$  时, 求取开关角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  以消除 5、7 次谐波, 并计算与输出电压  $v_{ac}$  相对应的 THD? 讨论使得  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  有解的  $m$  范围及其对应的 THD?

(2) 当  $n=5$  时, 为消除 5、7、11、13 次谐波, 求取使得  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 、 $\theta_5$  有解的  $m$  范围并计算与其相对应的 THD?

(3) 当  $n=15$  时, 为消除 5、7、11、13、17、19、23、25、29、31、35、37、41、43 次谐波, 求取使得  $\theta_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 有解的  $m$  范围并计算与其相对应的 THD?

(4) 探讨分析在相同  $m$  值下, 不同模块数  $n$  所对应  $\theta_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 解的相互包含关系? 综合分析随着模块数  $n$  增加, 输出电压  $v_{ac}$  波形质量的改善特性?

(5) 阶梯波调制波形如图 2 所示, 可看出在同一电压半波内不同级联模块产生方波电压不同, 因此各模块单元的变换功率不同, 为了能够使各 H 桥变换器单元在一定周期内实现功率均衡, 针对模块数  $n=20$  的级联型 H 桥变换器系统, 如何结合阶梯波调制和辅助控制策略来最优控制各模块开关  $S_{1i}$ 、 $S_{2i}$ 、 $S_{3i}$ 、 $S_{4i}$  ( $i=1, \dots, n$ ) ?



## B题：基于预测的邮轮定价策略研究

近年来乘坐邮轮旅游的人越来越多，邮轮公司的发展也非常迅速。如何通过合理的定价吸引更多的旅游者，从而为邮轮公司创造更多的收益，这也是众多邮轮公司需要探讨和解决的问题。

邮轮采用提前预订的方式进行售票，邮轮出发前0周至14周为有效预定周期，邮轮公司为了获得每次航行的预期售票收益，希望通过历史数据预测每次航行0周至14周的预定舱位人数、预订舱位的价格，为保证价格的平稳性，需要限定同一航次相邻两周之间价格浮动比，意愿预定人数（填写信息表未交款的人数）转化为实际预定人数（填写信息表并交款的人数）与定价方案密切相关。

已知某邮轮公司拥有一艘1200个舱位的邮轮，舱位分为三种，250个头等舱位，450个二等舱位，500个三等舱位。该邮轮每周往返一次，同一航次相邻两周之间价格浮动比不超过20%。现给出10次航行的实际预订总人数、各航次每周实际预订人数非完全累积表、每次航行预订舱位价格表、各舱位每航次每周预订平均价格表及意愿预订人数表、每次航行升舱后最终舱位人数分配表（详见附件中表sheet1-sheet5），邀请你们为公司设计定价方案，需解决以下问题：

1.预测每次航行每周预订舱位的人数，完善各航次每周实际预订人数非完全累积表sheet2。（至少采用三种预测方法进行预测，并分析结果。）

2.预测每次航行每周预订舱位的价格，完善每次航行预订舱位价格表sheet3。

3.依据附件中表sheet4给出的每周预订价格区间以及每周意愿预订人数，预测出公司每周给出的预订平均价格。

4.依据附件中表sheet1-sheet4，建立邮轮每次航行的最大预期售票收益模型，并计算第8次航行的预期售票收益。

5.在头等、二等舱位未满的情况下，游客登船后，可进行升舱（即原订二等舱游客可通过适当的加价升到头等舱，三等舱游客也可通过适当的加价升到头等舱、二等舱）。请建立游客升舱意愿模型，为公司制定升舱方案使其预期售票收益最大。