

指定谐波消除 PWM 和指定谐波抑制 PWM 分析

马小亮

(天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180)

(原名——天津电气传动设计研究所)

摘要:指定谐波抑制(SHM) PWM 已在我国的大功率四象限三电平变频器的 PWM 整流器中成功应用。SHM 是众所周知的指定谐波消除(SHE) PWM 的改进,它不把指定谐波消除到零,而是把它们抑制在谐波标准限制值之下,能取消或减小采用 SHE 时整流器电网侧所需之庞大且昂贵的 LC 滤波器。因介绍 SHM 的资料甚少,该技术尚不为人熟知。对改进 SHE 的原因、SHM 和 SHE 的区别及仿真和试验结果进行介绍。

关键词:指定谐波抑制;指定谐波消除;三电平整流器

中图分类号:TM461 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26557

Analysis of Selective Harmonic Elimination (SHE) PWM and Selective Harmonic Mitigation (SHM) PWM

MA Xiaoliang

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

(Former Name——Tianjin Design & Research Institute of Electrical Drive)

Abstract: The selective harmonic mitigation (SHM) PWM has been successfully used in PWM rectifiers of high power 4-quadrant 3-level frequency converters. The SHM is an improvement of the well-known selective harmonic elimination (SHE) PWM, its aim is not to eliminate selective harmonics as the SHE, only to keep all the harmonic levels under limitation levels of grid harmonic standard. The technique lead to a drastic reduction or avoidance of the bulky and costly grid connection LC filters. There are less reference materials introducing the SHM, thus it is unfamiliar. The reasons to improve the SHE, the differences between the SHM and SHE as well as the results of simulation and tests were shown.

Key words: selective harmonic mitigation (SHM); selective harmonic elimination (SHE); 3-level rectifier

大功率电力电子开关器件高压 IGBT 和 IGCT 在大功率两电平和三电平 PWM 变频器中广泛应用。由于器件开关损耗大,开关频率被限制在几百 Hz 且随开关频率增高变频器输出能力减小。ABB 公司的中压 ACS6000 四象限三电平变频器使用 4.5 kV/4 kA 高压 IGCT,其 PWM 整流器设有 3 个供选用的开关频率 f_s ,分别为 250 Hz, 350 Hz 和 450 Hz,由于三电平整流器中的每个开关器件只在半个基波周期中有开关动作另半个周期不动作,整流器 PWM 方波频率 f_{PWM} 加倍,分别为 500 Hz, 700 Hz 和 900 Hz,对应这 3 种频率的变频器输出容量分别为 11 MV·A, 9 MV·A 和 7 MV·A。在这么低的开关频率下若仍采用常用的载波或空间矢量 PWM 方法,整流器谐波大,宜采用能减

小谐波的其它 PWM 方法。

熟知的指定谐波消除(selective harmonic elimination, SHE) PWM 方法是一种能减小谐波的方法^[1-2],它能消除 PWM 电压中几个指定的低次特征谐波,在多个公司的大功率四象限两电平和三电平变频器产品的 PWM 整流器中应用,例如 ABB 公司的 ACS6000 变频器。SHE 的缺陷是:被指定的特征谐波被消除后,这几个谐波的能量被转移到没被消除的特征谐波,使其增大,特别是前几个大幅增加,导致网侧电压和电流超过电网谐波标准限制值,需在整流器和电网间增设较大且昂贵的 LC 滤波器。ACS6000 在其变频柜内设置了第 29 次特征谐波 LC 滤波器,吸收开关频率设置为 450 Hz 时的第一个没被消除的特征谐

波。开关频率设置为250 Hz和350 Hz时,因所需滤波器太大,装不进柜内。(我国某些公司已能把开关频率350 Hz所需滤波器装于柜内)。南水北调中线工程曾进口几套水泵传动变频器,ABB公司的ACS6000变频器宣传其采用基于SHE技术的PWM整流,网侧谐波小,但在设计审查时遇到问题,开关频率设置为450 Hz时谐波合格但装置容量不够,若改设为350 Hz,容量够但谐波超标。最后采用降低冷却水温度提高450 Hz时容量的办法解决。希望能找到改进方法。

针对SHE的这些缺陷,西班牙Seville大学提出一种改进方法——指定谐波抑制(selective harmonic mitigation, SHM) PWM方法^[3-4]。它不把指定的特征谐波消减到零,而是把它们抑制到谐波标准规定的限制值之下,减小转移的能量,从而减小没被抑制谐波的增大,可以取消或减小采用SHE时所需之庞大且昂贵的滤波器。许多人对SHM尚陌生,本文意在宣传此方法。

为比较两种方法,文中先在第1节介绍SHE,然后在第2节介绍SHM,第3节介绍两种方法的仿真和试验比较。

1 指定谐波消除SHE法

SHE的特点是能消除几个指定的低次特征谐波。以图1所示三相三电平PWM整流器为例说明其原理。整流器一个基波周期的相电压波形示于图2,它是同步、1/2对称(正负半周期对称)和1/4对称(半周期中左右对称)、半周期中方波数为奇数的PWM波,没有偶次及非整数次谐波,奇次谐波中三倍数的谐波在线电压中相互抵消,只含5,7,11,13,17,19,23,25,29,31等次特征谐波。

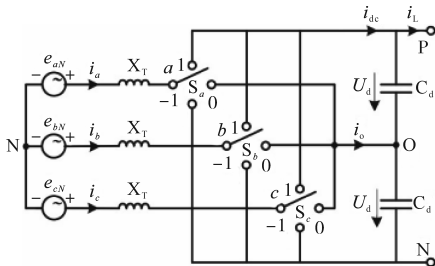


图1 三相三电平PWM整流器

Fig.1 3 phase 3-level PWM rectifier

图2中,各方波起始与终止时的开关相位角为1,2,3,⋯,4N。对该波形进行傅氏分析,根据奇偶性对其进行化简,各次谐波电压幅值 U_h 如下

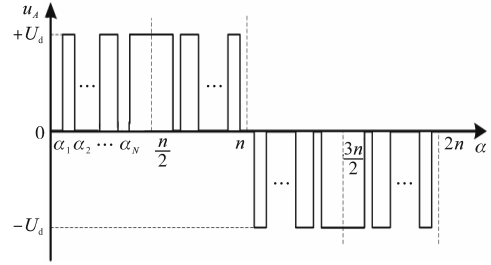


图2 相电压波形

Fig.2 Waveform of phase voltage

式所示:

$$U_h = \frac{4U_d}{h\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(h\alpha_i) \quad (1)$$

式中: h 为谐波次数, $h=2,3,4,\dots,h=1$ 为基波。

因输出电压波形1/2和1/4对称,则只要算出前1/4周期 N 个开关相位 α_i (i 为开关相位角序号),就可以根据对称定义算出另外3/4周期的开关相位角。

SHE可以消除的指定特征谐波个数为 $N-1$ 。电网频率50 Hz,若开关频率 $f_s=350$ Hz(PWM方波频率 $f_{\text{PWM}}=700$ Hz),则 $N=7$,可消除6个特征谐波。令基波幅值 U_1 等于电压给定值 U^* 及被指定的 $h=5,7,11,13,17,19$ 次6个特征谐波的幅值 $U_h=0$,解7元联立三角函数方程,求出1,⋯,7的值,去控制开关器件,便可消除被指定的谐波。

基波公式为

$$U_1 = \frac{4U_d}{\pi} \sum_{i=1}^7 (-1)^{i+1} \cos(\alpha_i) = U^* \quad (2)$$

6个特征谐波公式为

$$\begin{cases} U_h = \frac{4U_d}{h\pi} \sum_{i=1}^7 (-1)^{i+1} \cos(h\alpha_i) = 0 \\ h = 5,7,11,13,17,19 \end{cases} \quad (3)$$

解这联立方程需要反复迭代,无法在线实现,都离线解出,存于控制器内存中,工作时调用。开关相位角 α_i 与调制系数 $m=U_1/U_d$ 有关,还与1/4输出基波中的开关次数 N 有关。电机侧PWM逆变器输出电压和频率(频率影响 N)变化范围大,需要存贮的量太多,所以SHE少在此处使用。电网电压幅值变化范围小及频率固定,网侧PWM整流器需要存贮的量少,适合使用SHE。

SHE的缺陷是:被指定的谐波消除了,但它们的能量转移到没被消除的谐波,使其幅值增大,特别是前几个没被消除的谐波幅值大幅增加,导致网侧电压和电流超过谐波标准限制值,需要在整流器和电网间增设较大且昂贵的LC滤波器。

2 指定谐波抑制SHM法

SHM是SHE的改进,目标是减小使用SHE后增大的没被消除之谐波。SHM的原理是不把指定的特征谐波消减到零,而是把它们抑制到谐波标准规定的限制值之下,减小转移被抑制的指定谐波能量,从而减小没被抑制谐波的增大。

仍以图1、图2及 $N=7$ 为例说明其原理。保留基波公式式(2)不变,但把特征谐波公式从等式(3)改为不等式。

特征谐波不等式如下:

$$u_h = \frac{4U_d}{h\pi U_{IN}} \sum_{i=1}^7 (-1)^{i+1} \cos(h\alpha_i) \leq \rho L_{hU} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} u_h = U_h/U_{IN} \\ h = 5, 7, 11, \dots, q \end{cases}$$

式中: u_h 为第 h 次特征谐波幅值相对值; U_{IN} 为额定基波电压幅值; L_{hU} 为第 h 次电压谐波幅值限制值,%; ρ 为裕量系数(常取 $\rho=0.8$)。

图1中在电网和整流器之间有网侧电抗 X_T (含电源内阻抗、变压器漏抗及附加电抗),整流器产生的电流谐波对电网的影响比电压谐波更直接,因此式(4)中的电压谐波限制值 L_{hU} 宜根据谐波标准中电流谐波限制值 L_{hI} 算出:

$$L_{hU} = hX_T I_{hI} \quad (5)$$

L_{hU} 也可以直接采用谐波标准中规定的电压谐波限制值。因谐波标准中还规定有电流谐波限制值,所以在算出电压谐波 U_h 后还要根据 X_T 计算电流谐波 I_h ,查看是否超标。

SHE通过解联立方程计算开关相位角,方程个数必须等于 $1/4$ 基波周期的开关次数 N ,因此只能消除 $N-1$ 个特征谐波。与SHE不同,SHM通过解约束条件不等式计算开关相位角,不等式个数可以大于 $N-1$,故能抑制的特征谐波个数也可以大于 $N-1$,式(4)中 q 是想要抑制的最大特征谐波次数。谐波标准GB 12668.3—2012要求考虑谐波次数至40,可以取 $q=37$ (无38,39,40次谐波),在 $N=7$ 时SHM能抑制的特征谐波个数为12,而SHE只能消除6个特征谐波。

除指定特征谐波幅值限制约束条件(式(4))外,SHM的约束条件中还加入了窄脉冲宽度约束。开关器件的开通和关断都需要时间,如果两个相邻开关相位角太靠近(窄脉冲)可能导致浪涌和振荡,甚至会损坏器件,因此需要对窄脉冲宽度加以约束。

约束表达式为

$$\begin{cases} \alpha_{i+1} - \alpha_i > \delta \\ \alpha_1 > \delta/2 \\ \pi - \alpha_7 > \delta/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, \dots, 7$; δ 为以弧度为单位的最窄脉冲宽度。

当基波频率=50 Hz, $\delta=0.0126$ rad时,脉冲宽度不小于40 μ s。整流器电压及 δ 波形如图3所示。

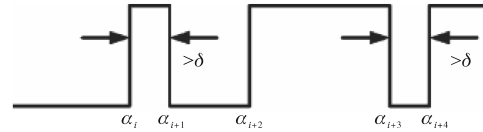


图3 整流器电压及 δ

Fig.3 Rectifier voltage and δ

根据上述约束条件(式(4)、式(5))算出的开关相位角不止一组,初始条件不同算出的结果也不同。需要定义一个目标函数,选用目标函数值最小组。目标函数定义不固定,3篇参考文献^[3-5]中的定义互不相同。文献[3-4]按总电压谐波定义目标函数,文献[5]以总电流谐波畸变量 E_T 作为目标函数,公式如下:

$$E_T = \sqrt{\sum_{i=2}^{13} [u_h / (hX_T)]^2} \quad (7)$$

3 SHM和SHE的仿真和试验比较

为比较SHM和SHE,天津电气院搭建了三电平PWM整流器仿真模型^[5]。模型中:电网线电压3.3 kV(RMS),整流器输入电流1.4 kA(RMS),直流电压 $U_d=2.7$ kV,滤波电抗 $X_T=20\%$,开关频率350 Hz($N=7$),抑制的最大特征谐波次数 $q=37$,电压特征谐波限制值 L_{hU} 按式(5)算出。

SHM的仿真结果示于图4。图4a为A相电流谐波柱状图,图中灰色数据柱对应电流谐波值,黑色数据柱对应谐波标准限值。从此图看出,虽然低次谐波电流较大,但所有谐波均在限值以下,符合要求。电流THD为10.1%小于谐波标准限值12%(未在图中示出)。图4b为A相电压和电流波形,因低次谐波电流较大,电压和电流波形有较明显的畸变。

SHE的仿真结果示于图5。图5a为A相电流谐波柱状图,同样灰色数据柱对应电流谐波值,黑色数据柱对应谐波标准限值。从此图看出,采用SHE时,23次以下6个低次特征谐波几乎全被消除,但是23次及以上的谐波量较采用SHM时

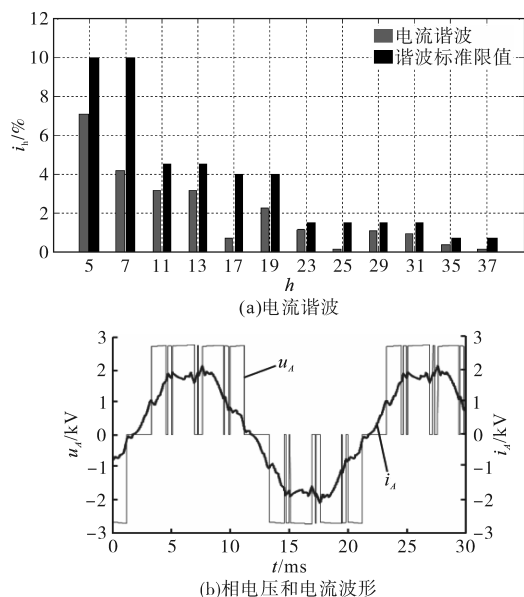


图4 SHM仿真结果

Fig.4 Simulation results of SHM

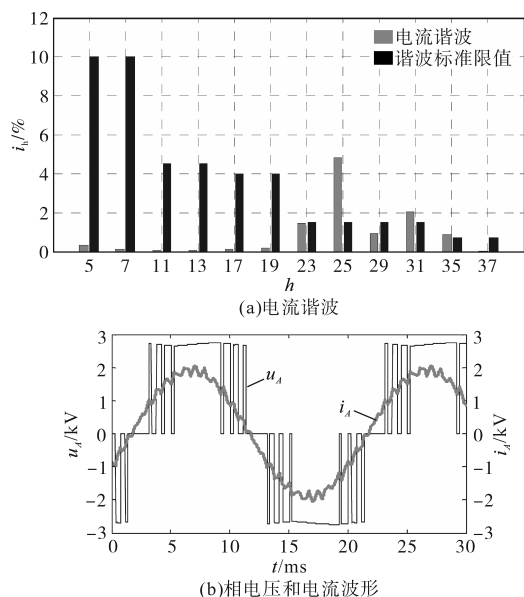


图5 SHE仿真结果

Fig.5 Simulation results of SHE

大,特别是25次谐波量超过限值约3倍。图5b为A相电压和电流波形,因低次谐波电流非常小,电压和电流波形较好。

Seville大学的三电平PWM整流器仿真和试验结果示于图6和图7^[4]。开关频率也是350 Hz ($N=7$),但SHM抑制的特征谐波个数与SHE相同,为6(最大抑制谐波次数 $q=19$),特征谐波电压限制值 L_{hU} 直接采用欧洲谐波标准规定的限制值(较小)。

图6是仿真得到的电压谐波柱状图,图中示出SHM和SHE的仿真结果、 L_{hU} 值(Grid Code)及前40次谐波的电压总畸变率(THD40)。从图中

看出:前6个特征谐波,SHE的电压值=0,SHM的电压值 $\neq 0$,但小于限制值 L_{hU} ;第23次是第一个未被消除或抑制的谐波,所有 ≥ 23 次的谐波均被放大且大于限值,但SHM的电压值均比SHE的电压值小很多,SHM的THD40电压值也小于SHE的值。

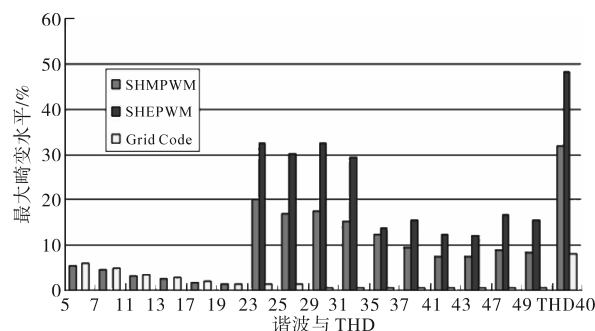


图6 电压谐波

Fig.6 Voltage harmonics

图7是试验得到的变换器线电压和相电流波形图。与图4b相比,因低次电压谐波小所以电压和电流波形畸变较小。与图5b相比,因低次电压谐波只是被抑制、没消减到零,所以电压和电流波形畸变稍大。

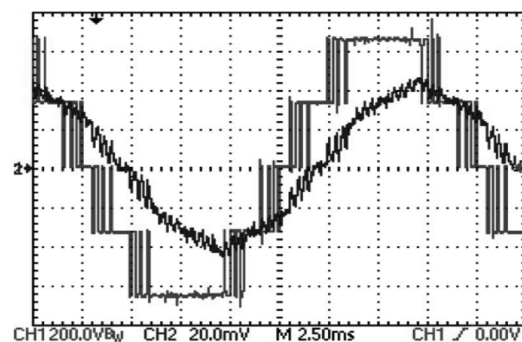


图7 线电压和相电流波形

Fig.7 Waveforms of line voltage and phase current

4 结论

高压IGBT和IGCT器件开关损耗大,开关频率被限制在几百Hz且随开关频率增高变频器输出能力减小,宜采用能减小谐波的PWM方法。

熟知的SHE法能消除输出电压中几个指定的低次特征谐波,在大功率四象限两电平和三电平变频器产品的PWM整流器中广泛应用。但其缺陷是:被指定的特征谐波被消除后,这几个谐波的能量被转移到没被消除的特征谐波,使其增大,特别是前几个大幅增加,导致网侧电压和电流超过电网谐波国家标准限制值,需在整流器和电网间增设较庞大且昂贵的LC滤波器。

SHM法是SHE法的改进,它不把指定的特征

谐波消减到零,而是把它们抑制到谐波标准规定的限制值之下,减小转移的被抑制的指定谐波能量,从而减小未被抑制谐波的增大,可以取消或减小采用SHE法时所需之庞大且昂贵的滤波器。

文中介绍和比较了这两种方法的原理、仿真和试验结果。

参考文献

- [1] 阮毅,杨影,陈伯时,等. 电力拖动自动控制系统-运动控制系统[M].(第5版).北京:机械工业出版社,2016.
Ruan Yi, Yang Ying, Chen Boshi, et al. Automatic control system of electric drive-motion control system[M]. (5th Edition). Beijing: China Machine Press, 2016.
- [2] 马小亮. 高性能变频调速及其典型控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
Ma Xiaoliang. High-performance variable-frequency speed regulation and its typical control systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [3] Franquelo L G, Napoles J, Guisado R C P, et al. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three-level PWM converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3022-3029.
- [4] Napoles J, Leon J I, Portillo R, et al. Selective harmonic mitigation technique for high-power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2315-2323.
- [5] 宋鹏,金雪峰,袁媛,等. 三电平整流器特定谐波抑制方法研究[J]. 电气传动, 2018, 48(12): 11-15.
Song Peng, Jin Xuefeng, Yuan Yuan, et al. Research on SHM-PWM method for three-level rectifier[J]. Electric Drive, 2018, 48(12): 11-15.
- [6] 齐昕,杨康,王辰宇,等. 具有低开关频率特性的指定谐波抑制预测控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8995-9006.
Qi Xin, Yang Kang, Wang Chenyu, et al. Predictive control of specified harmonic suppression switching strategies with low switching frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8995-9006.
- [7] 谷鑫,鲁金月,王志强,等. 基于无差拍电流预测控制的永磁同步电机谐波电流抑制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6345-6356.
Gu X, Lu J Y, Wang Z Q, et al. Harmonic current suppression strategy for permanent magnet synchronous motor based on deadbeat current prediction control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6345-6356.
- [8] 王臻. 永磁同步电动机矢量控制系统指定次谐波分析与抑制研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.
Wang Z. Research on analysis and suppression of specific-order harmonics in vector control system of permanent magnet synchronous motor[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [9] 李雄峰,张奇,叶涛维,等. 有源中点箝位型五电平逆变器SHE MPC研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(9): 1-5.
Li X F, Zhang Q, Ye T W, et al. Research on SHE MPC for active neutral point clamped five level inverter[J]. Power Electronics, 2023, 57(9): 1-5.

收稿日期:2025-04-09

修改稿日期:2025-07-18