

文章编号:1671-251X(2014)09-0061-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.09.015

叶满园,李宋,黎冰.多电平逆变器特定谐波消除控制技术研究[J].工矿自动化,2014,40(9):61-65.

多电平逆变器特定谐波消除控制技术研究

叶满园, 李宋, 黎冰

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为了深入分析多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制技术的非线性求解法,建立了多种迭代算法求解模型,研究了模型求解特点,对传统数值算法在特定谐波消除求解时所体现的不足进行了分析和改进。以七电平逆变器为例,给出了各算法在不同调制波段下的求解情况,对各算法中一些参量的设置及消谐效果进行了比较。仿真结果证明了各算法求解结果的正确性。

关键词:多电平逆变器;非线性方程组;多波段调制;特定谐波消除; SHEPWM

中图分类号:TD614 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Study of selected harmonics elimination control technology of multi-level inverter

YE Manyuan, LI Song, LI Bing

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University,
Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to analyze nonlinear method of selected harmonics elimination PWM technique of multi-level inverter in-depth, several solution models of iterative algorithm were established, solution characteristics of these models were studied, and deficiency of the traditional numerical algorithm in the selected harmonics elimination solution was analyzed and improved. Taking a seven-level inverter as an example, the calculated results in different wavebands of each iterative algorithm were given, and algorithm parameters and elimination effect were compared. The simulation results confirm that solutions of these algorithms are correct.

Key words: multi-level inverter; nonlinear equations; multi-band modulation; selected harmonic elimination; SHEPWM

0 引言

特定谐波消除脉宽调制(Selected Harmonics Elimination Pulse Width Modulation, SHEPWM)技术在同样的开关频率条件下,输出电压波形质量最好,在相同的波形质量条件下开关频率最低,自提出以来,便得到广泛关注,具有良好的研究价值^[1]。

为了获得一组消谐开关角,可对输出电压波形进行傅里叶级数分析,建立消谐非线性方程组,根据所要消除的指定低频次谐波进行求解。参考文献[2]

对基于 SHEPWM 的牛顿迭代法进行了研究,牛顿迭代法建立过程简单,求解速度快,每迭代一步,即构建一次切向量,若将多个迭代步骤相组合,可建立具有高阶收敛速度的修正牛顿法。参考文献[3]通过分析传统修正牛顿法的求解模型,进行了算法改进,论证了改进后算法的求解收敛性。实际上,在基于 SHE(Selected Harmonics Elimination)的求解中,根据所提出的修正法进行求解,往往会因为不适用的步长值使得求解偏离,导致不收敛,若考虑在求解初始对步长进行条件限制,设定求解方向,可建立

收稿日期:2014-01-03;修回日期:2014-07-08;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金项目(51167006);江西省青年科学基金项目(20114BAB216004)。

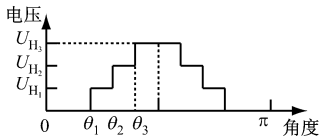
作者简介:叶满园(1978—),男,安徽蒙城人,副教授,硕士研究生导师,研究方向为电力电子与电力传动,E-mail:yemanyuan1@163.com。

收敛范围较大的直接搜索法。参考文献[4-5]对迭代算法的求解模型进行了深入的研究,分析并给出了算法求解的限制条件。参考文献[6-7]改良了算法求解的计算步骤,求解时不断修正迭代步长,提出了适用性更好的阻尼牛顿法。

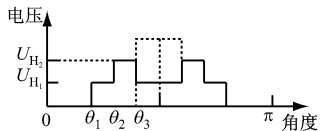
上述文献对传统 SHEPWM 消谐模型进行了相关研究,本文通过研究多种迭代算法的求解特点,建立了基于七电平级联 H 桥逆变器多波段 SHEPWM 的求解模型,并对各个波段所得到的开关角度进行分析,获得了一些具有普遍意义及参考价值的结论,考虑到多波段调制模式的特殊性,相关算法的研究成果也适用于三电平和其他多电平结构。

1 多电平逆变器多波段 SHEPWM 消谐模型

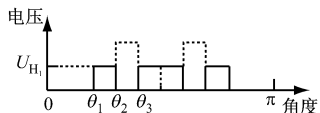
图 1(a)为传统的七电平梯型调制半周期波形,由于传统阶梯波的调制比可变范围比较窄,当调制比较小时,SHEPWM 非线性方程组会因为不收敛而无解。为此,参考文献[8-9]提出了多波段开关模式,该模式不仅可以在较低的开关频率下消除特定低频次谐波,而且调制比也拓宽到 0~1,其对应的波段模式阶梯波分别如图 1(b),(c)所示。图中 U_{H_1} , U_{H_2} 和 U_{H_3} 分别为级联 H 桥各单元直流侧电源电压; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为 SHEPWM 的开关角度。



(a) 七电平 A 波段模式阶梯波



(b) 七电平 B 波段模式阶梯波



(c) 七电平 C 波段模式阶梯波

图 1 多电平逆变器多波段 SHEPWM 波形

从波形演变过程不难看出,整个调制比范围分为 3 个部分。当调制比较高时,使用图 1(a)的波段模式,即传统的阶梯波。当调制比低于 0.485 时,可用图 1(b)的模式所代替,该波段是通过图 1(a)中阶梯波形沿着图 1(b)中虚线部分向下镜像折叠波段获得。依此类推,即可求解到调制比在 0~1 的范围

内消谐方程组的所有解。

2 各迭代算法数学模型的建立

2.1 牛顿迭代法数学模型的建立

牛顿迭代法是一种通过构造切向量将非线性方程组逐步线性化,不断逼近目标解的数值求解算法。设要求的非线性方程为

$$F(x) = 0 \quad (1)$$

对式(1)用泰勒公式在 x_0 处构造切向量:

$$F(x_0) + F'(x_0)(x - x_0) = 0 \quad (2)$$

对式(2)进行归纳分析可建立一般迭代模式:

$$x_{k+1} = x_k - (F'(x_k))^{-1} F(x_k) \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

不断递推式(3)直至满足一定条件,如 2 组解之间差量的绝对值小于某一定值。上述算法即为求解式(1)的牛顿迭代法。

由式(3)所构建的算法构造简单,由于切向量的引入,比二分法等分段式求解收敛速度快、精度高,但步长具有单一性,若求解时初值与结果间差值较大,则迭代次数会增多。为了改进不足,可将多个迭代步骤进行组合,获得具有高阶收敛速度的修正牛顿法,如式(4)所示。

$$x_{k+1} = x_k - (F'(x_k))^{-1} (F(x_k) + F(x_k - (F'(x_k))^{-1} F(x_k))) \quad (4)$$

上式将 2 个迭代步骤组合在一起,具有三阶收敛速度,参考文献[3]给出了另一种具有三阶收敛速度的修正牛顿法,如式(5)所示。

$$x_{k+1} = x_k - (F'((x_k + y_k)/2))^{-1} F(x_k) \quad (5)$$

其中:

$$y_k = x_k - F(x_k)/F'(x_k) \quad (6)$$

同理还可以组合更多的迭代步骤来获取较高收敛速度的牛顿迭代法。

2.2 直接搜索法数学模型的建立

前面建立的迭代模式虽然收敛速度快,但在实际求解中,初值往往与结果偏离较大,不在所构建算法的收敛域内,为了减少盲目求解,可进行条件设定,即迭代过程满足单调性要求^[4-5]:

$$|F(x_{k+1})| < |F(x_k)| \quad (7)$$

同时在式(3)中引入搜索因子 $\lambda (0 < \lambda \leq 1)$,有

$$x_{k+1} = x_k - \lambda F(x_k)/F'(x_k) \quad (8)$$

λ 初始化为 0.5,求解时将其逐次减半,直至满足式(7)。这种逐次搜索满足条件的算法称为直接搜索法(Direct Searching,DS)。

实际上还可对搜索条件进行改进,设置如下的

搜索方向：

$$|F(x_{k+1})| \leqslant (1-\mu\lambda)|F(x_k)| \quad (9)$$

式中： $0<\mu<1$ 。

求解时若条件满足则进入下一步迭代，且将搜索因子 λ 重新设定为

$$\lambda = \begin{cases} \lambda, & \text{若 } \lambda \text{ 值在上一步中减小} \\ \alpha, & \text{其他情形, } \alpha \text{ 为设定值} \end{cases} \quad (10)$$

当不满足条件时将 λ 减半，直至满足为止。这种具有较大收敛域的算法称为阻尼牛顿法^[6-7] (Damping Newton, DN)。

在式(4)中已经提到，组合多个迭代步骤能够加快算法的收敛速度，故可以考虑在 DN 法的基础上对式(8)进行改进：

$$x_{k+1} = x_k - \lambda(F'(x_k))^{-1}(F(x_k) + F(x_k - (F'(x_k))^{-1}F(x_k))) \quad (11)$$

将式(11)所述的迭代模式称为阻尼修正法。分析可知，由于迭代变量增大，搜索因子 λ 对不收敛情况的抑制力减小，方程求解的不确定性增大，此时可对步长 ΔH 进行条件设定：

$$\Delta H = \begin{cases} F(x_k)/F'(x_k), & \lambda \text{ 在上步或上上步中减小} \\ F'(x_k)^{-1}(F(x_k) + F(x_k - (F'(x_k))^{-1}F(x_k))), & \text{其他情形} \end{cases} \quad (12)$$

3 各算法多波段求解

本文以七电平逆变器为例，对建立的几种算法在多波段调制下的 SHE 开关角进行求解。消除 5 次和 7 次谐波，A,B,C 各波段调制下的初值分别设置为 $[15^\circ, 30^\circ, 60^\circ]$, $[40^\circ, 60^\circ, 80^\circ]$, $[15^\circ, 30^\circ, 40^\circ]$ ，搜索因子 λ 初始化为 0.5，求解结果见表 1。

由表 1 可知，将多个迭代步骤相组合，不仅使传统牛顿法在收敛速度上有所提高，无解情况也更少，但在低调制比下，由于步长值较大，使得 C 波段下的收敛性较差，此时算法便不适用。引入搜索因子后，直接搜索法中 C 波段下的收敛情况得到改善，但在整个调制比下收敛速度有所下降，为了提高求解速度，可对搜索条件及搜索因子的设定进行改进，建立收敛速度更快的阻尼牛顿法。

4 仿真分析

在前面算法的建模中，搜索因子 λ 统一初始化为 0.5，下面以阻尼牛顿法为例，将 λ 初值改为其他

表 1 牛顿迭代法、直接搜索法、阻尼牛顿法和修正牛顿法求解结果

波段调制模式	调制比 m_a	迭代次数			
		牛顿迭代法	直接搜索法	阻尼牛顿法	修正牛顿法
A 波段调制模式	0.85	无解	无解	无解	无解
	0.8	4	18	5	3
	0.75	5	18	6	4
	0.7	6	19	6	4
	0.65	无解	20	7	5
	0.6	无解	20	8	无解
	0.55	无解	无解	无解	5
	0.5	无解	43	8	6
	0.45	无解	无解	无解	无解
	0.4	无解	无解	无解	无解
B 波段调制模式	0.35	5	19	6	4
	0.3	6	20	6	4
C 波段调制模式	0.25	6	19	6	4
	0.2	7	22	9	无解
	0.15	6	44	9	无解
	0.1	无解	44	8	无解

值，测试其对收敛情况的影响，结果如图 2 所示。

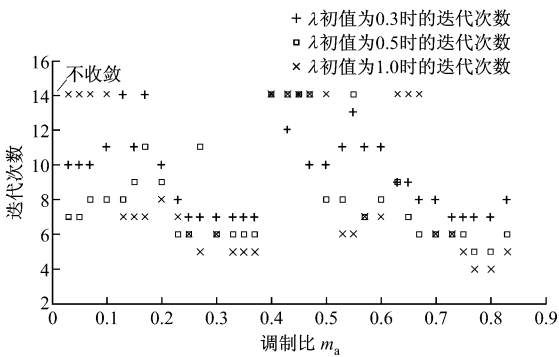


图 2 λ 初值对收敛性的影响

由图 2 可知， λ 初值为 0.5 时比初值为 1 时的迭代次数更多，收敛情况更好。当 λ 初值进一步降低到 0.3，高调制比区间 $[0.4, 0.5]$ 的收敛情况较好，而低调制比区间 $[0.1, 0.2]$ 的收敛情况较差。且随着 λ 初值的减小，算法的消谐精度增高。求解时可根据需要设置合适的搜索因子，相关消谐精度比较结果见表 2。

在式(11)、(12)中讨论过组合迭代步骤与引入搜索因子 λ 对算法的影响，相关比较结果如图 3 所示。

从图 3 可知，阻尼牛顿法相比阻尼修正法在

表 2 λ 初值对消谐精度的影响

谐波	调制比 m_a	电压含有率/%		
		$\lambda=1.0$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.3$
5 次谐波	0.53	0.08	0.08	0.03
	0.27	0.35	0.05	0.05
7 次谐波	0.53	0.04	0.04	0.05
	0.27	0.18	0.09	0.09

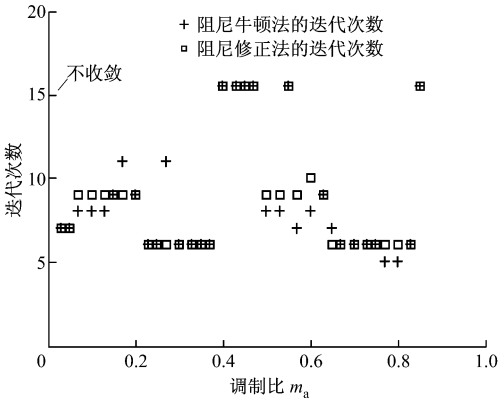
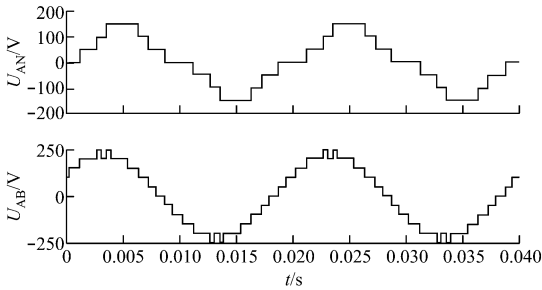


图 3 阻尼牛顿法与阻尼修正法的收敛结果对比

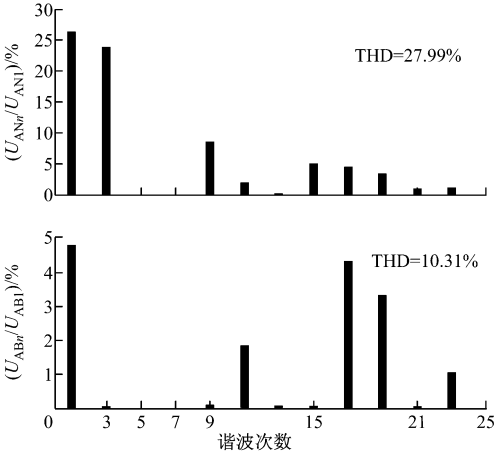
[0,0.8]的调制比区间内总体的迭代次数更少,2 种算法不收敛的情况相当。由于搜索因子 λ 与组合迭代步骤均会对算法产生影响,并未达到提高收敛速度的效果。在有解的情况下,两类修正牛顿法迭代次数普遍比阻尼牛顿法少,实际上,若了解各算法的求解区间,可设置切换模式,在两类修正牛顿法与阻尼牛顿法之间投切,满足收敛性与求解速度的要求。

为了验证求解结果及理论分析的正确性,本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件对七电平逆变器多波段 SHEPWM 控制进行了建模及仿真研究。仿真参数:独立直流电压源电压为 50 V。由于各算法间求解结果相同或相近,且不同的求解值对消谐结果无影响,故本文统一以阻尼牛顿法下的求解结果进行仿真研究。A,B,C 波段分别取调制比为 0.67,0.30 和 0.23 时求解的开关角度。图 4—图 6 分别给出了上述 3 个波段下所对应的七电平逆变器输出电压(相电压 U_{AN} ,线电压 U_{AB})仿真波形及频谱分布。

图 7 给出了整个调制波段下相电压的 5 次和 7 次谐波电压含有率。由图 7 可知,由于计算及算法精度的影响,各调制模式下的 5,7 次谐波电压含量并未完全消除,且不同调制比下求得的消谐角度存在的误差不同。上述结果表明,进行 SHE 的开关角求取并不能达到百分百精确,而这些微小的误差在实际工程控制中可忽略不计,故本文所建立的

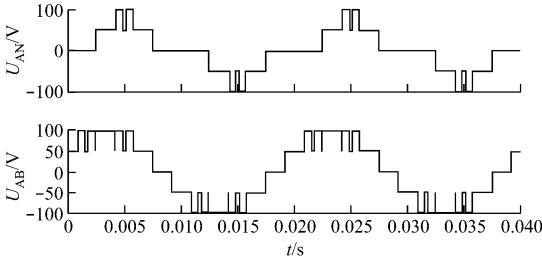


(a) 相电压与线电压仿真波形

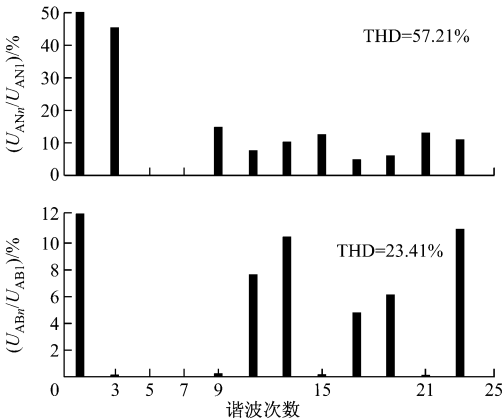


(b) 相电压与线电压频谱分布

图 4 A 波段下 m_a 为 0.67 时相电压与线电压的仿真波形和频谱分布

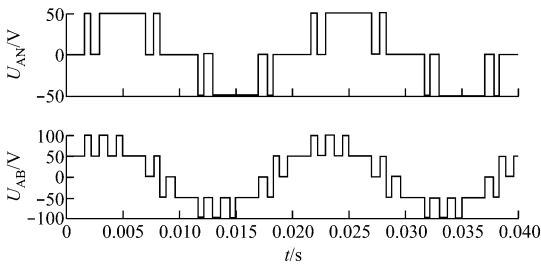


(a) 相电压与线电压仿真波形

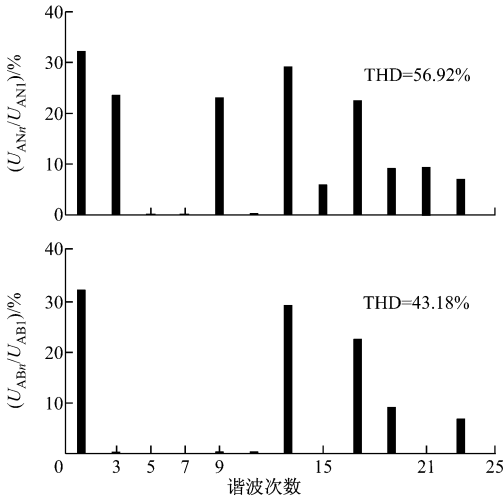


(b) 相电压与线电压频谱分布

图 5 B 波段下 m_a 为 0.30 时相电压与线电压的仿真波形和频谱分布



(a) 相电压与线电压仿真波形



(b) 相电压与线电压频谱分布

图 6 C 波段下 m_a 为 0.23 时相电压与线电压的仿真波形和频谱分布

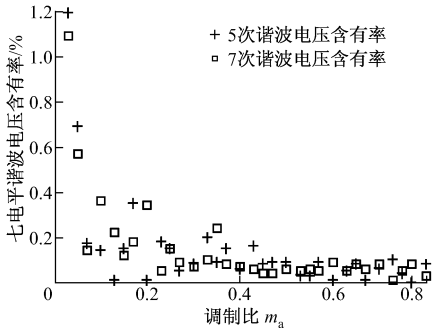


图 7 相电压 5 次和 7 次谐波电压含有率
各算法的求解结果是正确的。

5 结语

对多电平逆变器特定谐波消除控制技术进行了仿真研究,得出以下结论:

(1) 组合算法的迭代步骤能够提高消谐求解速度,在一定程度上扩大了求解区间。限制迭代步长和设定求解条件,可以扩大算法的收敛域。

(2) λ 初值小,收敛情况较好,若进一步减小,在一些低调制比区间段反而不收敛,且迭代次数增

大。 λ 初值越大,求解速度越快,但收敛性较差,且一些调制比区间段下求得的结果消谐精度更低。

(3) 所建立的各算法在求解特点上有所不同,修正牛顿法收敛速度快,收敛性较差,阻尼牛顿法收敛性较好。

(4) 采用多波段的调制模式能够求得低调制比下消谐非线性方程组的解,但不同调制比下消谐精度有所不同。

参考文献:

[1] RAU N S, NECSULESCU C. Probability distributions of incremental cost of production cost [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1985, 104(12):3493-3500.

[2] ENJETI P, LINDSAY J F. Solving nonlinear equations of harmonic elimination PWM in power control[J]. Electronics Letters,1987,23(12):656-657.

[3] 王晓锋. 两类修正的 3 阶收敛的牛顿迭代格式[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011,16(1):113-115.

[4] TORCZON V. On the convergence of the multidirectional search algorithm[J]. SIAM Journal on Optimization; a Publication of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1991, 1 (1): 123-145.

[5] ALEFELD G, GIENGER A, POTRA F. Efficient numerical validation of solutions of nonlinear systems [J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1994, 31(1):252-260.

[6] DEENIS J E. Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations[M]. Philadelphia: SIAM,1996:86-106.

[7] BELLAVIA S, GASPARO M G, MACCONI M. A Switching-method for nonlinear systems[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics,1996,71(1): 83-93.

[8] GUAN E Y, SONG P G, YE M Y, *et al.* Selective harmonic elimination techniques for multilevel cascaded H-bridge inverters [C]// IEEE PEDS '05, Kuala Lumpur,2005:1441-1446.

[9] CHIASSON J N, TOLBERT L, MCKENZIE K J, *et al.* An unified approach to solving the harmonic elimination equations in multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (2): 478-490.