基于果蝇优化算法的三电平逆变器SHEPWM方法的研究

以基于IGCT的大功率三电平逆变器为研究对象，深入研究了特定谐波消除技术，针对求解非线性超越方程组的复杂性，提出运用果蝇优化算法求解非线性方程组。和传统的方法相比，该方法初值设置简单，同时编程容易，设置参数少，收敛速度快，全局寻优能力强。在Matlab/Simulink环境下对三电平NPC逆变器进行仿真，验证了该算法的正确性。在以TMS320F28335控制器为核心的实验平台上进行实验研究，实现了SHEPWM的控制。

宋克俭　路尚书　罗晓飞　石志学／冶金自动化研究设计院

宋克俭／硕士研究生

关键词／Keywords

果蝇优化算法·
三电平逆变器·
脉宽调制·
特定谐波消除·

近年来，高压大容量的变频系统成为电力电子领域的研究热点。三电平NPC逆变器由于其特殊的结构，可以使单个开关管的耐压值降低，功耗减小，dv/dt和THD相比两电平逆变器也都有明显的降低[1]，从而得到广泛的应用，其结构如图1所示。在三电平NPC逆变器的实际应用中，脉宽调制是一项至关重要的控制技术。到目前为止，已经有许多PWM技术被提出，如SPWM、SHEPWM和SVPWM等。根据相关国家标准的要求，变频器在并网运行时对谐波含量有一定的限制，即需要消除一些特定的低次谐波。与其他调制技术相比，特定谐波消除脉宽调制（SHEPWM）技术有一系列的优点，在消除低次谐波方面也有很好的效果。

SHEPWM技术通过对开关角的优化选择，恰当地输出控制逆变器的调制波形，从而使逆变器输出的电压波形不含特定的低次谐波。对于SHEPWM技术而言，关键在于非线性超越方程组的求解。文献[2-3]分别运用同伦算法和同伦牛顿算法，也得到了较好的效果，但是传统的求解方法对初值的依赖程度较高，初值选得不合适，可能会导致不收敛。文献[4-5]分别运用遗传算法和蚁群算法，解决了传统算法对初值依赖程度高的问题，但是计算比较复杂，设置参数较多，收敛速度慢，有时也会陷入局部最优。

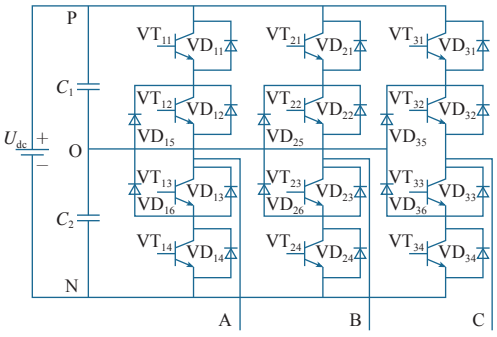


图1　三电平NPC逆变器拓扑结构

果蝇优化算法（Fruit Fly Optimization Algorithm，FOA）是我国台湾学者潘文超于2011年7月提出的一种智能群体搜索算法，是以果蝇的觅食行为为依据所推演出的一种全局寻优法[6]。至今，FOA在函数优化、财务管理等领域已得到了应用。虽然FOA在电力电子领域应用不多，但是鉴于其强大的求解优化能力，将其运用于电力电子领域，对功率器件开关规律的研究及非线性系统的研究都是一种全新的方法。

FOA对初值要求不太高，编程和参数设置都比较简单，收敛速度相对

国家国际科技合作专项项目（2013DFA10810）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

较快，有较强的全局寻优能力，因此将其运用于求解非线性议程组。以三电平NPC逆变器为研究对象，在Matlab/Simulink环境下仿真研究了SHEPWM技术消除谐波的效果。同时，运用以TMS320F28335控制器为核心的实验平台进行实验研究，对SHEPWM技术进行实验验证，得到了较为理想的效果。

三电平SHEPWM的基本原理及其方程组的建立

SHEPWM技术通过对开关角的优化选择，达到消除低次谐波的效果。首先确定所要消除的谐波次数，然后建立逆变器输出电压波形的数学模型，最后对非线性超越方程组进行求解，得到相应的开关角，从而达到逆变器输出的电压波形不含特定低次谐波的目的。

以三电平中性点钳位逆变器的A相输出电压U_{AN}为例，其波形如图2所示。由图2可知，U_{AN}波形满足：①在0～2π周期内积分值为零，可积；②U_{AN}所示周期函数在单个周期内的间断点即为所对应的开关角，则间断点是有限的；③从工程的角度理解，在单个周期内可以认为极值点是有限个的。故满足狄利克雷定理，对其进行傅里叶分解可得

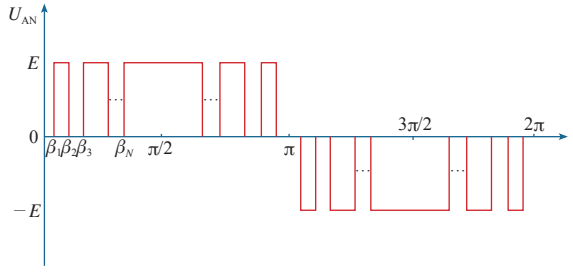


图2　三电平SHEPWM单相电压波形

$$U_{AN}(\omega t)=\sum_{n=1}^{\infty}[a_n\sin(n\omega t)+b_n\cos(n\omega t)] \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} a_n=\dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_0^{2\pi}U_{AN}(\omega t)\sin(n\omega t)\mathrm{d}(\omega t) \\ b_n=\dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_0^{2\pi}U_{AN}(\omega t)\cos(n\omega t)\mathrm{d}(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

为了便于分析求解，假设输出的单相电压波形半波对称且1/4周期对称，根据式（1）和图2的开关角度可得

$$\begin{cases} a_n=\begin{cases}\dfrac{4E}{n\pi}\displaystyle\sum_{i=1}^{N}[(-1)^{i+1}\cos(n\beta_i)] & n=\text{odd}^+ \\ 0 & n=\text{even}^+\end{cases} \\ b_n=0 \quad n=N^+ \end{cases} \tag{3}$$

式中，$E=U_{dc}/2$；$0°<\beta_1<\beta_2\cdots<\beta_{N-1}<\beta_N<90°$。

设定自由度为N。由式（3）可知，可得到一组由N个独立方程构成的非线性超越方程组，在已设定基波幅值的情况下，求解方程组得到N个开关角β_i，可以消除（$N-1$）个指定的低次谐波。由于假设单相输出电压波形半波对称，则不含偶次谐波，在三相对称运行的电力系统中，线电压已自动消除3的倍数次谐波，故消除的目标应为非3倍数的奇次谐波。令矢量$\boldsymbol{\beta}=[\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_{N-1},\beta_N]$，得到目标非线性方程组如下

$$\begin{cases} g_1(\boldsymbol{\alpha})=\dfrac{a_1}{E}=\dfrac{4E}{\pi}\displaystyle\sum_{i=1}^{N}[(-1)^{i+1}\cos(\beta_i)]=m \quad n=1 \\ g_n(\boldsymbol{\alpha})=\dfrac{a_n}{E}=\dfrac{4E}{n\pi}\displaystyle\sum_{i=1}^{N}[(-1)^{i+1}\cos(n\beta_i)]=0 \\ n=5,7,11,\cdots,6j-1,6j+1,\cdots,K \end{cases} \tag{4}$$

式中，m为调制比，$m=a_1/E=a_1/(U_{dc}/2)$。K为可消除的最低次谐波次数，当自由度N为奇数时，$K=3N-2$；当自由度N为偶数时，$K=3N-1$。

果蝇优化算法及方程组的求解

1. 果蝇优化算法的步骤

1）随机初始化果蝇群体所在的位置，结果为

$$\begin{cases} \text{init}\,X=X_0 \\ \text{init}\,Y=Y_0 \end{cases} \tag{5}$$

2）设定果蝇个体随机觅食的方向与距离，可以表述为

$$\begin{cases} X_i=X_0+\text{rand}() \\ Y_i=Y_0+\text{rand}() \end{cases} \tag{6}$$

3）由于无法确定食物的具体位置，需要估计果蝇个体与原点之间的距离D，然后计算其味道浓度判定值S，味道浓度判定值和距离是倒数关系，即

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$D=\sqrt{X_i^2+Y_i^2}$$
$$S=\frac{1}{D}=\frac{1}{\sqrt{X_i^2+Y_i^2}} \tag{7}$$

4）将味道浓度判定值代入味道浓度判定函数（Fitness Function），求出果蝇个体所在位置的味道浓度（Smell），即

$$\text{Smell}=\text{Function}(S) \tag{8}$$

5）找出果蝇群体中味道浓度最佳的果蝇（以求极大值为例），即

$$[\text{bestSmell_bestIndex}]=\max(\text{Smell}) \tag{9}$$

6）保留最佳味道浓度值与相应的X、Y坐标值，此时果蝇群体利用视觉定位飞向目标食物所在位置，即

$$\begin{aligned}&\text{Smellbest}=\text{bestSmell}\\&X_0=X(\text{bestIndex})\\&Y_0=Y(\text{bestIndex})\end{aligned} \tag{10}$$

7）进入迭代寻优，重复执行步骤2）～步骤5），同时判断味道浓度是否优于前一次迭代的味道浓度，如果是则执行步骤6）。

2. 方程组的求解

由式（4）可得

$$\begin{aligned}G(\boldsymbol{\beta})&=[g_1(\boldsymbol{\beta})-m\quad g_5(\boldsymbol{\beta})\quad g_7(\boldsymbol{\beta})\cdots g_n(\boldsymbol{\beta})]^{\mathrm{T}}\\&=[0\quad 0\quad 0\cdots 0]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{\beta}=[\beta_1\quad\beta_2\quad\beta_3\cdots\beta_{N-1}\quad\beta_N]$，$0°<\beta_1<\beta_2\cdots<\beta_{N-1}<\beta_N<90°$。

令

$$\begin{cases}x_1=g_1(\boldsymbol{\beta})-m\\x_2=g_2(\boldsymbol{\beta})\\x_3=g_3(\boldsymbol{\beta})\\\quad\vdots\\x_{n-1}=g_{n-1}(\boldsymbol{\beta})\\x_n=g_n(\boldsymbol{\beta})\end{cases} \tag{12}$$

则求解非线性方程组问题就转化为一个多目标的优化问题。可将其转化为单目标优化问题，建立目标函数为

$$\min[F(\boldsymbol{x})=1+\sum_{i=1}^{n}|x_i|]$$

下面以消除5、7、11、13、17和19次谐波为例，运用FOA求解式（11），计算出开关角度[β_1, β_2, β_3, β_4, β_5, β_6,β_7]，由式（12）可得出所求方程组为

$$\begin{cases}g_1(\boldsymbol{\beta})-m=x_1\\g_2(\boldsymbol{\beta})=x_2\\g_3(\boldsymbol{\beta})=x_3\\g_4(\boldsymbol{\beta})=x_4\\g_5(\boldsymbol{\beta})=x_5\\g_6(\boldsymbol{\beta})=x_6\\g_7(\boldsymbol{\beta})=x_7\end{cases}$$

设置FOA的参数，该方法参数比较少，只有两个参数：迭代次数（Maxgen）和种群规模（Sizepop）。在此设置为Maxgen＝100，Sizepop＝40，运用Matlab编程求解。

由于求解过程中存在多组解情况，在满足误差限制（小于10^{-4}）的情况下，以总谐波畸变率最小为优化目标，经过83次迭代得到一组满足限制条件的开关角，轨迹如图3所示，则该算法的收敛速度较快，寻优能力较强。由图3可以看出，对于一个特定的m而言，都有一组与之相对应的解，可知该算法具有较好的收敛性。

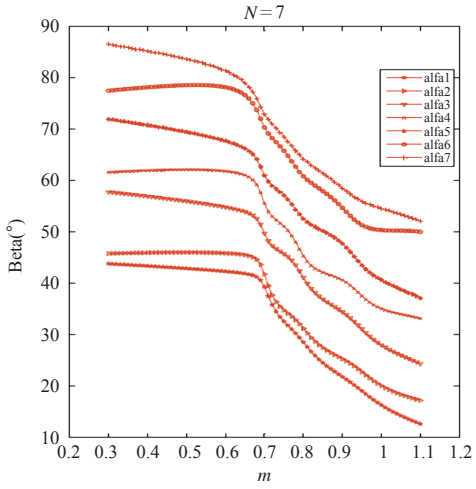


图3　不同调制度下的开关角轨迹

仿真研究

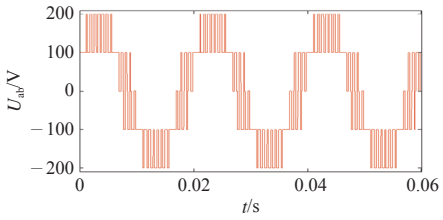
为了验证FOA结果在谐波消除方面的效果，在Matlab/Simulink环境下，搭建了三电平NPC逆变器模型并进行仿真分析。以消除5、7、11、13、17和19次谐波为例，设定调制度m＝0.95，自由度N＝7，得出的开关角度如下表所示。输出频率为50 Hz

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

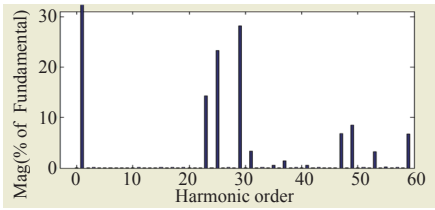
时的负载线电压波形及相应的频谱分析如图4a、b所示。

表　$m=0.95$，$N=7$的开关角计算结果

β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
19.089	22.786	31.143	37.576	43.544	51.353	55.984



（a）U_{ab}仿真波形

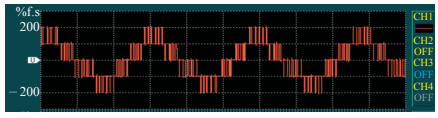


（b）U_{ab}频谱分析

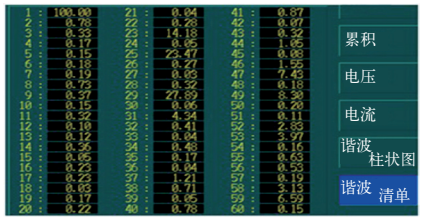
图4　线电压波形及频谱

实验研究

为了进一步验证FOA在三电平NPC逆变器SHEPWM中的有效性，实验室以5SHY35L4510 IGCT为主开关元件，以TMS320F28335 DSP为核心控制芯片搭建了三电平NPC逆变器实验平台，并且进行了实验研究。图5为采用HIOKI功率分析仪检测到的负载线电压波形及其谐波清单。由图5可以看出，5、7、11、13、17和19次谐波基本上已经被消除，满足相关标注的要求，验证了基于FOA的三电平NPC逆变器SHEPWM方法的准确性。



（a）U_{ab}实验波形



（b）U_{ab}谐波清单

图5　线电压实验波形及频谱

结束语

提出了一种基于FOA的三电平NPC逆变器特定谐波消除技术，由于FOA的初值设定简单，参数少，计算编程简单，收敛速度快，全局寻有能力强，大大提高了计算的速度和准确性。在Matlab/Simulink环境下，搭建了三电平NPC逆变器仿真电路并进行了仿真分析，同时在实验平台上进行了实验验证。虽然FOA是一种比较优秀的智能优化算法，但也存在一定的不足，如在离线求解过程中偶尔会陷入不稳定状态，需要进一步优化。

参考文献

[1] Wu B．High-power converters and AC drives [M]．Wiley IEEE Press，2006．

[2] 谢运祥，周炼，彭宏．逆变器消谐PWM模型的同伦算法 [J]．中国电机工程学报，2000，20 (10)：23-26．

[3] 石媛，李明勇，胡传西，等．逆变器SHEPWM的数学模型及其开关角计算方法 [J]．舰船科学技术，2010，32 (8)：203-206．

[4] 王群京，胡存刚，李国丽，等．基于遗传算法的三电平逆变器SHEPWM方法的研究 [J]．中国科学技术大学学报，2009，39 (8)：848-852．

[5] Sundareswaran K，Jayant K，Shanavas T N．Inverter harmonic elimination through a colony of continuously exploring ants [J]．IEEE Transactions on Electron Devices，2013，35 (2)：2558-2565．

[6] Pan Wen-Tsao．A new fruit fly optimization algorithm：taking the financial distress model as an example [J]．Knowledge-Based Systems In Press，2011．

[7] 李涛，张晓锋，乔鸣忠．NPC逆变器特定谐波组消除法 [J]．电气传动，2011，41 (5)：25-30．

（收稿日期：2015－02－14）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net