

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛНИ ТИРИСТОРНИ

## R L C ИНВЕРТОРИ. НОРМАЛИЗИРАНИ ПРИМЕРИ

Евгений Иванов Попов, доц. д-р инж.

Аврора Евгениева Попова

Технически университет – София, БЪЛГАРИЯ

Тел. 965-2642, email: epopov@vmei.acad.bg

### Попов Е. . . . I. . . . Investigation of Serial Thyristor R L C Inverters.

Normalised Examples. In this article an investigation of serial thyristor RLC inverters is carried out taking into account the approach used for obtaining their generalised characteristics. In the beginning the first harmonic component of the inverter current is found when the last is continuous and the RLC circuit is either in oscillatory or overdamped mode. That is especially important for calculating the klirrfactor of the inverter current. Then normalised PSPICE examples are introduced and expressions for calculating their parameters are suggested. Several such examples are run when the inverter operates with discontinuous (oscillatory mode) or continuous (oscillatory, critical or overdamped mode) output current. The results are arranged in a table and are compared with those obtained from the generalised characteristics, which receive good theoretical confirmation and for some practical cases an experimental one as well. The direct application of these examples is in the practice of laboratory assignments. This helps the proper understanding of the behaviour of serial thyristor RLC inverters. The computer program for calculating the generalised characteristics may serve as a basis for organising an adequate inverter control system.

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

В [1] са получени основните обобщени характеристики на последователни тиристорни RLC инвертори (фиг. 1), а именно изходна характеристика  $OCH$ , входна характеристика  $ICH$ , характеристика на възстановяването  $TQC$  (или  $TQCO$ , когато цялата индуктивност е съсредоточена във веригата на захранващия източник), характеристика на максималното напрежение на тиристора  $UVSM$  и характеристика на клирфактора на изходния ток  $k_f[\%]$  във функция от коефициента на товара  $B$  и от фактора на мощността на товара  $cos\varphi$

на инверторната верига. Тези характеристики са хармонизирани с характеристиките на другите полупроводникови RLC инвертори [2], [3].

За проверка на горните характеристики, както и изобщо за изследването на последователните тиристорни RLC инвертори е подходящо да се съставят примери за симулация с PSPICE, които е удобно да бъдат в относителни единици. От друга страна за получаването на клирфактора на инвертирания ток е необходимо да бъде известен първият му хармоник (в относителни единици). За режим на прекъснат ток (режим на естествена комутация) математическите зависимости за първия хармоник са известни от [4], докато за режим на непрекъснат ток на инвертора (режим на принудителна комутация), същите засега не са познати.

Цел на настоящия научен доклад е да се изведат математическите изрази за определянето на първия хармоник на тока на инвертора, а от него и на клирфактора му, в режим на непрекъснат ток в относителни единици. Друга цел е да се предложи начин за определянето на параметрите на примери за изследването на този тип инвертори с програмата PSPICE в относителни единици (нормализирани примери), като резултатите от тях да потвърдят основните обобщени характеристики на инверторите, които за някои практически случаи са потвърдени и експериментално. В този смисъл по съдържание този доклад се явява естествено продължение на [1].

## 2. ПЪРВИ ХАРМОНИК НА ИНВЕРТИРАНИЯ ТОК В РЕЖИМ НА НЕПРЕКЪСНАТ ТОК

След разлагане в ред на Фурие, съгласно [6], на моментната стойност на инвертирания ток в относителни единици в режим на непрекъснат ток от [5] се получава, че при колебателен характер на процесите в инверторната верига

( $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ), където  $L=L_1+L_2$ , амплитудата на косинусоидалната съставка на

първия хармоник също в относителни единици е

$$(1) \quad a_1 = a_{11} + a_{12},$$

където

$$(2) \quad a_{11} = \frac{2K}{\pi} (1 - a \frac{\delta}{\omega_0}) \cdot \left\{ \frac{n^2}{\frac{\delta^2}{\omega_0^2} + (n-1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( \frac{\delta}{n\omega_0} \sin \frac{n-1}{n} \pi + \frac{n-1}{n} \cos \frac{n-1}{n} \pi \right) - \frac{n-1}{n} \right] - \frac{n^2}{\frac{\delta^2}{\omega_0^2} + (n+1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( \frac{\delta}{n\omega_0} \sin \frac{n+1}{n} \pi + \frac{n+1}{n} \cos \frac{n+1}{n} \pi \right) - \frac{n+1}{n} \right] \right\}$$

$$(3) a_{12} = \frac{2K}{\pi} a \cdot \left\{ \frac{n^2}{\delta^2 + (n-1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( -\frac{\delta}{n\omega_0} \cos \frac{n-1}{n} \pi + \frac{n-1}{n} \sin \frac{n-1}{n} \pi \right) + \frac{\delta}{n\omega_0} \right] + \frac{n^2}{\delta^2 + (n+1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( -\frac{\delta}{n\omega_0} \cos \frac{n+1}{n} \pi + \frac{n+1}{n} \sin \frac{n+1}{n} \pi \right) - \frac{\delta}{n\omega_0} \right] \right\}$$

В горните изрази  $\delta$  е затихването на инверторната верига,  $\omega_0$  е собствената ѝ честота,  $K$  е обобщеният коефициент на разколебаване [5], а  $n = \frac{\omega}{\omega_0}$  е коефициентът на прекъснатост.

Амплитудата на синусоидалната съставка на първия хармоник в относителни единици е

$$(4) b_1 = b_{11} + b_{12}$$

където

$$(5) b_{11} = \frac{2K}{\pi} (1-a) \frac{\delta}{\omega_0} \cdot \left\{ \frac{n^2}{\delta^2 + (n-1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( -\frac{\delta}{n\omega_0} \cos \frac{n-1}{n} \pi + \frac{n-1}{n} \sin \frac{n-1}{n} \pi \right) + \frac{\delta}{n\omega_0} \right] - \frac{n^2}{\delta^2 + (n+1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( -\frac{\delta}{n\omega_0} \cos \frac{n+1}{n} \pi + \frac{n+1}{n} \sin \frac{n+1}{n} \pi \right) + \frac{\delta}{n\omega_0} \right] \right\}$$

$$(6) b_{12} = \frac{2K}{\pi} a \cdot \left\{ \frac{n^2}{\delta^2 + (n-1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( -\frac{\delta}{n\omega_0} \sin \frac{n-1}{n} \pi - \frac{n-1}{n} \cos \frac{n-1}{n} \pi \right) + \frac{n-1}{n} \right] + \frac{n^2}{\delta^2 + (n+1)^2} \left[ e^{\frac{\delta \pi}{\omega_0 n}} \cdot \left( -\frac{\delta}{n\omega_0} \sin \frac{n+1}{n} \pi - \frac{n+1}{n} \cos \frac{n+1}{n} \pi \right) + \frac{n+1}{n} \right] \right\}$$

Амплитудата на първия хармоник на инвертирания ток в относителни единици се определя от геометричната сума на амплитудите на косинусоидалната и синусоидалната съставки.

При аperiодичен характер на процесите в инверторната верига ( $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ),

като в този случай по аналогия се приеме  $n = \frac{\omega}{\Omega}$ , където  $\Omega$  е квазирезонансната честота на инверторната верига, се получават следните математически изрази

$$(7) a_{11} = \frac{2K}{\pi} (1 - a \frac{\delta}{\Omega}) \cdot \left\{ \frac{1}{(-\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot (\frac{\delta}{\Omega n} - \frac{1}{n}) \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] - \right. \\ \left. - \frac{1}{(\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot (\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n}) \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] \right\}$$

$$(8) a_{12} = \frac{2K}{\pi} a \cdot \left\{ \frac{1}{(-\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot (\frac{\delta}{\Omega n} - \frac{1}{n}) \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] + \right. \\ \left. + \frac{1}{(\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot (\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n}) \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] \right\}$$

$$(9) b_{11} = \frac{2K}{\pi} (1 - a \frac{\delta}{\Omega}) \cdot \left\{ \frac{1}{(-\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] - \frac{1}{(\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] \right\}$$

$$(10) b_{12} = \frac{2K}{\pi} a \cdot \left\{ \frac{1}{(-\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] + \frac{1}{(\frac{\delta}{\Omega n} + \frac{1}{n})^2 + 1} \cdot [e^{-\frac{(\delta+1)\pi}{\Omega n}} + 1] \right\}$$

Горните зависимости са заложиени в програмата за изчисление, използвана за получаването на характеристиките и спомената в [1].

### 3. НОРМАЛИЗИРАНИ ПРИМЕРИ. ПАРАМЕТРИ

При изследването на последователни тиристорни RLC инвертори с помощта на програмата PSPICE по схемата от фиг.1 като се вземат под внимание [4] и [5] е удобно да се използват относителни единици, като се положи  $U_d = 1000 \text{ V}$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ . Тогава останалите параметри на инверторната верига се получават от зависимостите:

- При колебателен характер на процесите в инверторната верига

$$(11) \quad \omega_0 = 1000 \text{ s}^{-1}$$

$$(12) \quad R = \frac{2B \cos \varphi}{\sqrt{4B \sin \varphi - B^2 \cos^2 \varphi}} \quad [\Omega]$$

$$(13) \quad C = \frac{4B \sin \varphi - B^2 \cos^2 \varphi}{4B \sin \varphi} \quad [mF]$$

$$(14) \quad f = \frac{10^3}{\pi \sqrt{4B \sin \varphi - B^2 \cos^2 \varphi}} \quad [Hz],$$

където  $f$  е честотата на управление.

- При аperiодичен характер на процесите в инверторната верига

$$(16) \quad \Omega = 1000 \quad s^{-1}$$

$$(17) \quad R = \frac{2B \cos \varphi}{\sqrt{B^2 \cos^2 \varphi - 4B \sin \varphi}} \quad [\Omega]$$

$$(18) \quad C = \frac{B^2 \cos^2 \varphi - 4B \sin \varphi}{4B \sin \varphi} \quad [mF]$$

$$(19) \quad f = \frac{10^3}{\pi \sqrt{B^2 \cos^2 \varphi - 4B \sin \varphi}} \quad [Hz]$$

- При критично-аperiодичен характер на процесите в инверторната верига

$$(20) \quad \delta = 1000 \quad s^{-1}$$

$$(21) \quad R = 2 \quad [\Omega]$$

$$(22) \quad C = 1 \quad [mF]$$

$$(23) \quad f = \frac{10^3}{4\pi \operatorname{tg} \varphi} \quad [Hz]$$

#### 4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Резултатите от множество изследвания на последователни тиристорни RLC инвертори са приведени в Таблица 1.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прави впечатление доброто съвпадение на резултатите от изследванията получени чрез основния метод, описан в [1] и с помощта на програмата PSPICE, което потвърждава верността на обобщените характеристики на последователните тиристорни RLC инвертори. В примерите от практиката под номера 7, 8 и 9 се наблюдава добро съвпадение със съответните експериментални резултати [4]. Примерите от Таблица 1 могат да се използват непосредствено за изучаването на свойствата на разглежданите инвертори при провеждането на лабораторни упражнения. Логиката и математическите зависимости, заложи в компютърната програма за изчисляването на обобщените характеристики биха могли да служат като основа за организирането на подходяща управляваща система на инвертора.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Е. И. "Обобщени характеристики на последователни тиристорни RLC инвертори", Сборник доклади на Десетата международна научна и научно-приложна конференция "Електронна техника – ЕТ'2001", Созопол, 26-28.9.2001 г.

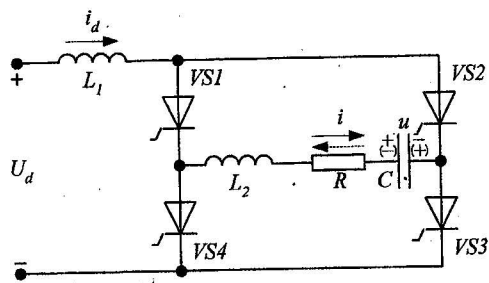
2. Popov E. I. "A new unified approach towards the analysis of semiconductor RLC inverters", Proceedings of the Seventh National Scientific and Applied Science Conference with International Participation "ELECTRONICS – ET'98", Sozopol, Bulgaria, September 1998.

3. Popov E. I. "Generalized characteristics of semiconductor RLC inverters", Proceedings of the Seventh National Scientific and Applied Science Conference with International Participation "ELECTRONICS – ET'98", Sozopol, Bulgaria, September 1998.

4. Попов Е. И. "Автоматично регулиране на последователни тиристорни инвертори с променящ се товар", Дисертация за присъждане на научната степен "Кандидат на техническите науки", Технически университет, София, 1978 г.

5. Popov E.I. "Analysis of serial thyristor inverter with forced commutation", Proceedings of the Ninth National Scientific and Applied Science Conference with International Participation "ELECTRONICS – ET'2000", Sozopol, Bulgaria, September 2000.

6. Атабеков Г.И. "Основы теории цепей", Изд, "Энергия", Москва, 1969.



Фиг.1

Таблица 1.

№	$\cos\varphi$	$B$	Режим. Характер на процесите. Файл.	$OCH$	$ICH$	$TQC$	$TQCO$	$UVSM$	$n = \frac{\omega}{\omega_0}$	$k_f$ [%]	Метод	Забелешка
1	0,2	0,4	РПТ Колебателен SI0204.CIR	1,01 1,004	0,082 0,089	0 0	0,215 0,215	8,15 7,85	1,6	30,2 27	[1] PSPICE	
2	0,2	1,4	РПТ Колебателен SI0214.CIR	1,20 1,20	0,403 0,431	0,221 0,216	0,244	3,18 3,09	0,86 0,87	15,4 15,3	[1] PSPICE	
3	0,2	4,4	РПТ Колебателен SI0244.CIR	1,59 1,586	2,22 2,33	0,314 0,311	0,337	2,02 2,04	0,493 0,497	64,3 64	[1] PSPICE	
4	0,8	3,0	РПТ Колебателен SI0830.CIR	1,12 1,12	3,03 3,039	0 0	0,0333 0,0335	1,09 1,3	1,67	28,5 28,1	[1] PSPICE	
5	0,8	4,0	РПТ Алеридичен SI0840.CIR	1,14 1,14	4,19 4,192	0 0	0,025 0,0256	1,06 1,245	2,5	34,5 33,9	[1] PSPICE	
6	0,8	3,75	РПТ Крит.-апер. SI08375.CIR	1,14 1,136	3,91 3,93	0 0	0,0264 0,0266	1,06 1,06	21,1	33,2 32,8	[1] PSPICE	
7	0,406	1,87	РПТ Колебателен SISTCA01.CIR	1,25 1,248	1,19 1,215	0,167 0,164	0,213	1,63 1,71	0,8 0,804	24 23,8	[1] PSPICE	Практ. сл. Акт. товар 100 kW
8	0,1867	2,5026	РПТ Колебателен SISTCA03.CIR	1,39 1,346	0,897 0,762	0,278 0,28	0,301	2,65 3,28	0,645 0,666	41 37,2	[1] PSPICE	Практ. сл. Рез. крѳг 100 kW
9	0,5913	0,4174	РПТ Колебателен PSIT2.CIR	1,01 1,13	0,251 0,218	0 0	0,135 0,139	2,80 2,54	1,76	33 30	[1] PSPICE	Пар.-посл. инвертор на ток