

Проектиране на резонансни инвертори  
с последователен претъпящ кръг

Петър Томчев Иванов ТУ - Габрово  
Деян Тодоров Алексиев ТД "Далекосъобщения" - Габрово  
Райна Георгиева Иванова ТУ - Габрово

Projecting of resonance inverter with serial vibrating circle

( resume )

We take into consideration a resonance inverter with backward diodes which alternating current circuit is a serial vibrating circle. Its load is an inductive heater with certain resistance  $R$ , induction  $L$  and power  $\cos\varphi$  the inverter works in the rate of automatic switch-off of the main appliances before the end of the decay period. By those new methods of projecting, the compensating condenser and, if necessary, the gear ratio of the co-ordinating transformer can be determined. Also, that can be done with the rest of the electric values. The main principles of the methods are two: *first*, the quality factor of the serial circle resulting from the set load and *second*, the determined by the inverter rate correlation between its own frequency and the control frequency ( $\omega_{ck}/\omega$ ), measured according to quazirate methods. The result of the computer experiments and those of the calculations corroborate the exactness of the method.

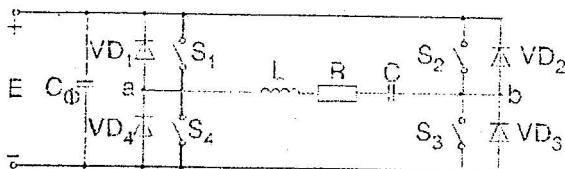
В последните години в токозахранващите източници на уредбите за индукционно нагряване широко се използват резонансни инвертори (РИ) с променливотокови вериги (ПТВ) във вид на последователен претъпящ кръг [1,2,3,5]. В тях е налице последователна компенсация на индуктивността на товара (нагревателния индуктор), параметрите  $R$  и  $L$  на които изпълняват ролята на двата от елементите на последователния кръг. При изпълнението на инвертора се въвежда само един допълнителен елемент - компенсиращият кондензатор  $C$ , докато при паралелната компенсация допълнително е необходим още и компенсиращият дросел с индуктивност  $L_K$ .

Получаващата се естествена простота и икономичност е голямо, но не най-важното предимство на тези инвертори. Главното е, че последователният претъпящ кръг създава възможност, чрез изменение на честотата, регулиране на мощността и съгласуване в по-широк диапазон, отколкото при паралелната компенсация. Това лесно се обяснява с факта, че последователният кръг прави инвертора аналог на последователния с активен товар. С промяната на честотата, в съответствие със степента на разстройка на кръга, която е като правило капацитивна, се изменя променливия ток на

инвертора (на товара) и напрежението на реактивните  $L$ - $C$  елементи, т.е. и на товара. Наред с тези и някои други предимства, получават се и някои недостатъци, спрямо автономните инвертори с паралелен кръг, а именно: 1) Токът през ключовите прибори (транзисторите) е равен на товарния; 2) При висък  $\cos \varphi$  на товара напреженията върху индуктивността  $L$  и кондензатора  $C$  са високи. По причина на големите натоварвания на приборите и реактивните елементи, тези инвертори се изпълняват с по-малка мощност, отколкото с паралелната компенсация.

Сведенията за проектирането на РИ с обратни диоди (ОД), работещи с последователна компенсация на товара, са оскъдни. С настоящата работа се прави опит да се формира цялостен алгоритъм и методика за определяне на електрическите им величини и елементи.

Преди да се дадат изчислителните съотношения и реда на проектиране, следва да се извършат следните дадености и особености: 1) Приемайки индуктивността  $L$  на товара, намираща се в ПТВ, да служи и за колебателна индуктивност на инвертора, възможна се оказва само схема на РИ с ОД. В мостово изпълнение тя е показана на фиг. 1.



Фиг. 1.

2) При дадени параметри  $L$  и  $R$  на товара, известен се оказва и качественият фактор  $Q = \omega L/R = tg \varphi$  на инвертора. В съответствие с това, проектирането трябва най-напред да предвижда реализацията на зададеното или определеното, в зависимост от вида на инвертора, отклонение на честотите  $\omega_{СК}/\omega$  (виж класификационната таблица в [3,4]) чрез съответната стойност на ъгъла  $\delta$  ( $tg \delta$ ).

От израза [ ]

$$\frac{\omega_{СК}}{\omega} = \sqrt{\frac{tg \delta}{Q} \frac{1}{Q^2}} \quad (1)$$

за  $tg \delta$  се получава следната формула:

$$tg \delta = \frac{1 - 4Q^2 \left(\frac{\omega_{СК}}{\omega}\right)^2}{4Q} = \frac{1 - 4tg^2 \varphi \left(\frac{\omega_{СК}}{\omega}\right)^2}{4tg \varphi} \quad (2)$$

От (2) се вижда, че  $tg \delta$  може веднага да се определи по известния  $\cos \varphi$  на товара и зададения режим ( $\omega_{СК}/\omega$ ) на РИ. След това, знаейки

съпротивлението  $R$  в променливотоковата верига (на товара), се определя компенсацията (той играе ролята и на компенсиращ кондензатор  $C$ , а именно:

$$C = \frac{I}{\omega \cdot tg \delta \cdot R} \quad (3)$$

Правилното определяне стойностите на  $tg \delta$  и  $C$ , съответстващи на зададения товар, е гаранция за меродавно проектиране на швертора, за което е препоръчителна следната изчислителна процедура.

1) Фиксират се величините от задаването: мощност  $P$  [kW]; работна честота  $f$  [Hz]; напрежение на товара  $U_{Ter}$  [V]; параметри на товара  $L_3$  [H],  $R_3$  [ $\Omega$ ],  $\cos \varphi$  напрежение  $U_{MP}$  [V] и честота  $f_{MP}$  [Hz] на захранващата мрежа.

2) Избира се режим на работа на РИ, например с естествено изключване на ключовите прибори (може да бъде и груп).

3) Задава се интервала на паузата  $t_0$  [°ел].

4) По метода на квазиграничния режим [3] се определя отношението  $\omega_{CK}/\omega$ .

5) Изчислява се  $tg \delta$  по (2).

6) В съответствие с квазиграничния режим на работа на швертора, се изчислява ъгъл  $\varphi_1$ , равен на [3]

$$tg \varphi_1 = 0,407 tg \delta - \sqrt{0,135 tg^2 \delta - 0,189} \quad (4)$$

7) Определят се максималните стойности на напреженията  $U_{Im}$ ,  $U_{Rm}$ ,  $U_{Tm}$ ,  $U_{Cm}$ , съответно по формулите

$$U_{Im} = \frac{\pi \cdot E}{2 \cos(\delta - \varphi_1)} \quad (5)$$

$$U_{Rm} = U_{Im} \cos \delta \quad (6)$$

$$U_{Tm} = U_{Rm} / \cos \varphi \quad (7)$$

$$U_{Cm} = U_{Im} \sin \delta \quad (8)$$

В (5)  $E$  е напрежението на постояннотоковия захранващ източник.

8) Изчисляват се стойностите на елементите  $L$  и  $R$ , които трябва да се включат в променливотоковата верига за осигуряване режима на работа на швертора.

$$R = \frac{U_{Rm}^2}{2P}, \quad L = \frac{tg \varphi \cdot R}{\omega} \quad (9)$$

Ако намерените стойности на  $R$  и  $L$  не съвпадат с известните по задание  $R_3$  и  $L_3$ , в схемата на РИ се въвежда съгласуващ трансформатор, коефициентът на трансформация, на който е равен

$$K_{T^*} = \sqrt{\frac{R}{R_3}} \quad (10)$$

Като правило, съгласуваният трансформатор е понижаващ. Когато товарът е достатъчно високоомен, както е при обемното индукционно нагряване, възможно е директното му включване в променливотоковата верига на инвертора.

9) Определя се по (3) капацитетът на кондензатора  $C$ .

10) Определят се средните стойности на тока през ключовите прибори (КП), през обратните диоди и на тока, консумиран от захранващия източник, съответно по изразите (за режима с естествено изключване на КП).

$$I_{0кп} = \frac{1}{2\pi} \int_{t_0}^{\pi} i(\vartheta) d\vartheta = \frac{E}{4\omega L_K} \left[ \operatorname{tg}(\delta - \varphi_1)(1 + \cos t_0) - \sin t_0 - \frac{t_0^2}{\pi} + t_0 \right] \quad (11)$$

$$I_{0од} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{t_0} i(\vartheta) d\vartheta = \frac{E}{\omega L_K} \left[ \operatorname{tg}(\delta - \varphi_1)(1 - \cos t_0) + \sin t_0 + \frac{t_0^2}{\pi} - t_0 \right] \quad (12)$$

$$I_0 = 2(I_{0кп} - I_{0од}) \quad (13)$$

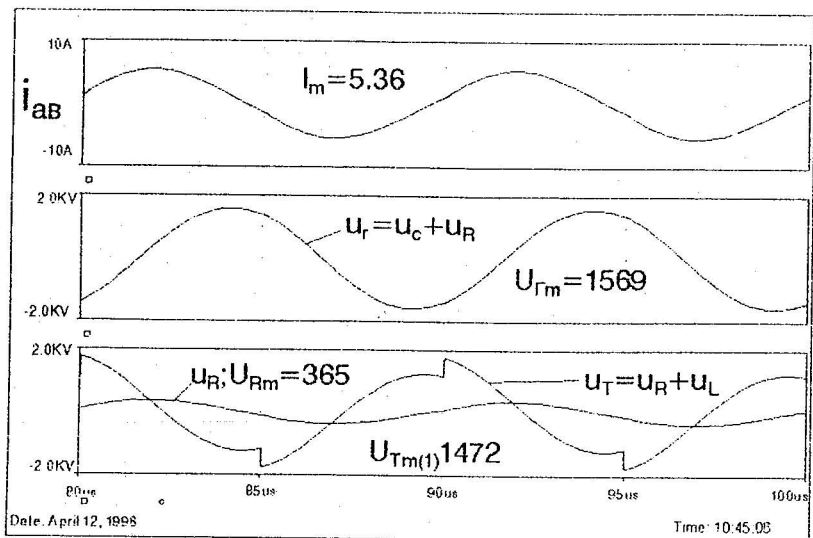
Критерий за вярност на получените резултати от проектирането е равенството на тока  $I_0$  от (13) и теоритичния ток  $I_{0ТЕОР}$ , който трябва да консумира от захранващия източник при зададена мощност  $P$  и захранващо напрежение  $E$ .

Достоверността на изложената методика е проверена чрез компютърно симулиране работата на инвертора чрез програмния симулатор PSPICE.

В табл.1 са дадени получените по приведената методика и от симулирането стойности на величините и на елементите, а на фиг.2 - времедиаграмите на токовете и напреженията при следните входни данни:  $P=1000W$ ;  $f=100kHz$ ;  $E=300V$ ;  $t_0=20\mu s$ ;  $\cos\varphi=0,25$ .

Табл.1.

Величина	од/во	$t_0$ сЛ	$\operatorname{tg}\delta$	R Ω	L μH	C пF	$U_{ам}$ V	$U_{RиД}$ V	$U_{ТиД}$ V	$U_{ем}$ V	$I_0$ A	P W
теоретична	1.045	20	4	73	452	5.43	1579	383	1532	1532	3.33	1000
комп. симулр.	-	20	-	67.3	426	5.43	1569	365	1472	1556	3.22	966



Фиг. 2.

Анализът на числените данни и на времедиаграмите показва, че е налице напълно приемливо съвпадение на резултатите, което дава основание да се одобри методиката с нейните изчислителни съотношения и логична последователност. Верификация на методиката е получена и чрез експериментални изследвания на инверторите. Това е още едно потвърждение и на метода на квазиграничния режим за проектиране и анализ на РИ с ОД, който и при последователен товарен кръг показва висока степен на точност, както и при паралелния.

РИ с последователен товарен кръг се използват най-често в индукционните закалочни уредби. Причините за това са две: 1) Съгласуваният трансформатор в случая е необходим, независимо от схемата на компенсация; 2) Факторът на мощността  $\cos \varphi$  на товара е относително висок, което води до получаването на относително помалки токове в товара и през КП, а също и до по-ниски напрежения на кондензатора  $C$  и на индуктивността  $L$  (на първичната намотка на трансформатора). По-рядко е тяхното използване в индукционните топлини уредби, където  $\cos \varphi$  е много по-нисък, особено при топене на цветни и немагнитни метали и сплави. Ако се прибегне до подобряване на  $\cos \varphi$  на пещта, чрез използване на подходящи магнитопроводи и

концентратори на магнитния поток, каквито са тези от типа "Гипхроп" на едноименната американска фирма, може с успех и тук да се прилагат РИ с ОД и последователен товарен кръг.

#### Изводи

Разработена и верифицирана е методика за проектиране на РИ с ОД, работещи в уредбите за индукционно нагряване с последователен товарен пренептяц кръг. Ръководно начало на методиката е обстоятелството, че при дадени параметри на индуктора и режим на работа на инвертора с известно отношение на честотите  $\omega_{ск}/\omega$ , ъгълът  $\delta$  ( $tg\delta$ ) в  $R-C$  частта на променливотоковата верига на инвертора има обективно детерминирана стойност.

Определени са електрическите величини и схемните елементи на инвертора в т.ч. и преводното отношение на необходимия съгласуващ трансформатор.

1. Rudnev V.I., Cook R.L., Loveless D.L., Black M.R., INDUCTION HEAT TREATMENT, Michigan, USA, 1997.

2. Н.Солрад, Электрические преобразователи энергии, Санкт Петербург: Т.Ер-10021-96, Дрезен, 1998.

3. Годоров Т., Алексиев Д., Магжаров Н., Ивайлов П., Автономни инвертори, Габрово, 1996.

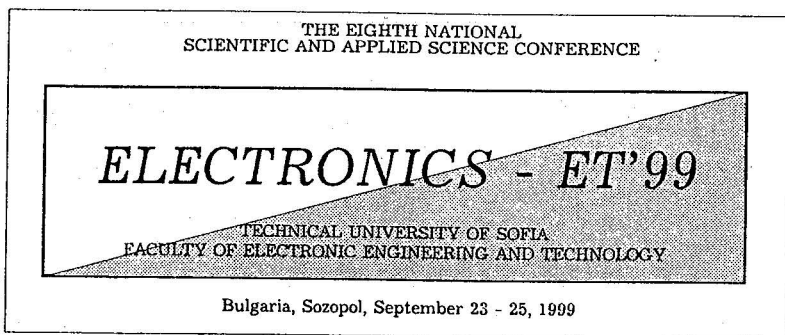
4. Д.Т. Алексиев, Метод на квазиравнощния режим за проектиране на резонансни инвертори с обратни диоди, Научно-приложна конференция "Силова електроника-96", Габрово, 26-27.06.1996.

5. Каталог и проспекти на фирмите: INDUCTOHEAT, TOCCO, HUTTINGER, PILLAR, ELVA, LEPEL, AEG-ELOTHERM и др. 1992-1998.

The Eighth National Scientific and Applied Science Conference  
"ELECTRONICS - ET'99" will take part in Sozopol, Bulgaria,  
September, 23 - 25, 1999.

### MAIN TOPICS

- \* Digital Signal Processing
- \* Education in Electronics
- \* Electronic Systems in Measurement and Control
- \* Electronic Medical Equipment
- \* Electronics in Scientific Investigation
- \* Embedded Systems
- \* Microelectronics
- \* Modelling and Analysis in Electronics
- \* Power Electronics
- \* Quantum and Optoelectronics



### CORRESPONDENCE ADDRESSES:

Assoc. Prof. Ph.D. R. Ivanov, Faculty of Electronic Engineering and Technology, Technical University of Sofia, Sofia 1797, BULGARIA  
Phone: + 359 - 2 - 636 2220, E-Mail: rmi@cait-gate.vmei.acad.bg

Assoc. Prof. Dr. Ir. G. C. M. Meijer, Dept. of Electrical Engineering, Delft University of Technology, Mekelweg 4, 2628 CD Delft, THE NETHERLANDS  
Phone: +31 15 2786174, Fax: +31 15 2785922, E-Mail: G.C.M.Meijer@et.tudelft.nl

Assoc. Prof. Ph.D. S. Ovcharov, Department of Electronics, Technical University of Sofia, Sofia 1797, BULGARIA  
Phone: + 359 - 2 - 636 3241, E-Mail: sovcharo@vmei.acad.bg