

АНАЛИЗ НА РЕЗОНАНСНИ ИНВЕРТОРИ С ОГРАНИЧЕНИЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО НА КОМУТИРАЩИЯ КОНДЕНЗАТОР

Доц.д-р Никола Петров Градинаров, д-р Николай Атанасов Хинов, Инж. Димитър
Дамянов Арнаудов

Технически Университет - София

E-mail: n_gradinarov@yahoo.com hinov@yahoo.com d_arnaudov@yahoo.com

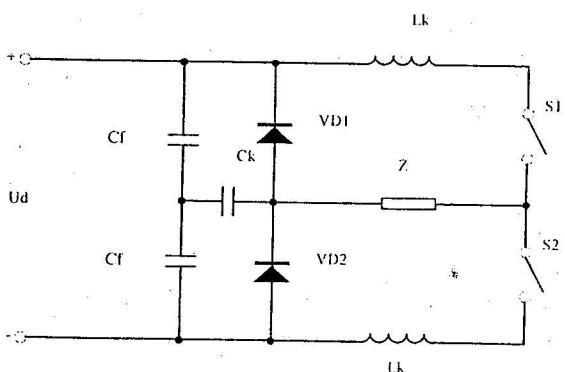
A novel topology of full-bridge resonant inverters with limited voltage on the commutating capacitor is investigated in this paper. The circuit of this inverter is shown on fig.1. A special feature of the circuits with limiting of voltage on the C_k is that they limit the active power on the load, not depending on its parameters. The paper presents analysis of limited voltage resonant inverters across committing capacitors operating on a regime of natural commutation. In the paper are obtained new formulas for determining the load current and the voltage across the commutating capacitor.

The results are obtained by using the coefficient of the hesitation of series resonant inverters circuit - k and the corresponding to it parameter of this inverter k_C . The results of the analysis facilitate the determination of all necessary parameters for the design of such inverter.

Подобряването на характеристиките на класическите Резонансни инвертори (РИ) може да се постигне чрез използване на възможностите на самата силова схема, като се ограничават напреженията на комутиращите елементи или на товара.

На изследването и анализа на РИ с ограничение на напрежението на комутиращия кондензатор са посветени различни публикации [1, 2].

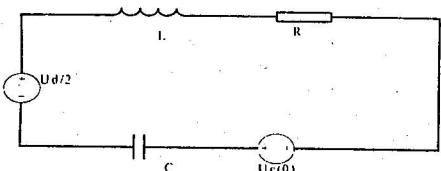
В работата се предлага анализа на тези схеми да се извърши съобразно използвания от авторите подход за анализ на РИ [3].



Фиг.1

Базова схема при настоящите разглеждания е полумостовата схема показана на фиг.1, където в променливотоковата Върига участва последователно или паралелно компенсиран товар Z_T . До момента, когато напрежението

на комутиращия кондензатор достигне стойности $\pm \frac{U_d}{2}$, работата на схемата не се отличава от тази при обикновената схема на РИ с разделен захранващ източник и е в сила следното диференциално уравнение (според схемата показана на фиг.2):



фиг.2

паралелна компенсация, L и C са съответните еквивалентни комутиращи елементи за двата възможни режима на работа.

При 1режим (когато се ограничава напрежението на целия комутиращ кондензатор) $C=C_k$, а $L=L_k$ при резонанс на паралелния товарен кръг или $L=L_k+L_e$, $L_e=L_T$ при последователна компенсация или $L_e=L_{(1)}$ - при индуктивна разстройка на паралелния товарен кръг.

При 2режим (когато се ограничава напрежението на част от комутиращия кондензатор) $L=L_k$ - при паралелна компенсация и капацитивна разстройка или $L=L_k+L_T$ - при последователна компенсация на товара, $C=\frac{C_k C_e}{C_k + C_e}$, където $C_e=C_{(1)}$ - при паралелна компенсация и капацитивна разстройка на товарния кръг или $C_e=C_T$ - при последователна компенсация на товара.

Представено в операторен вид уравнение (1) изглежда по следния начин:

$$\frac{\frac{U_d}{2} + U_c(0)}{p} = RI_1(p) + pLI_1(p) + \frac{1}{pC} I_1(p).$$

След неговото решаване, обратно преобразуване и представяне в нормиран спрямо управляващата честота ω и кондензиран вид за инвертирания ток - и напрежението на еквивалентния комутиращ кондензатор се получават следните изрази [4]:

$$(1) \quad \frac{U_d}{2} = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt - U_c(0)$$

където $R=R_T$ (активно товарно съпротивление) - при последователна компенсация или $R=R_{(1)}$ (активно съпротивление по първи хармоник на последователната заместваща схема) - при

$$(2) \quad i_1(\vartheta) = \frac{U_d + U_c(0)}{\omega_{01}L} e^{-\frac{\delta}{\omega_{01}}\vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda_1} \vartheta,$$

$$(3) \quad u_C(\vartheta) = \frac{U_d}{2} - \left(\frac{U_d}{2} + U_c(0) \right) \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_{01}} \right)^2} e^{-\frac{\delta}{\omega_{01}}\vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda_1} (\vartheta + \varphi_1),$$

$$\text{където } \varphi_1 = \frac{\lambda_1}{\pi} \varphi_1 = \frac{\lambda_1}{\pi} \arctg \frac{1}{\delta},$$

$U_C(0) = U_{ck}(0) + U_{ce}(0)$ е началната стойност на напрежението на еквивалентния комутиращ кондензатор,

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2} \quad \text{и} \quad \delta = \frac{R}{2L} \quad \text{са съответно резонансната честота и}$$

$$\text{затухването на последователния резонансен кръг, } \lambda_1 = \frac{\pi \omega}{\omega_{01}} = \pi v_1.$$

В момента t_d съответстващ на ъгъл θ_d , комутиращия кондензатор C_k се зарежда до напрежение $\frac{U_d}{2}$, като в този момент настъпва промяна

в конфигурацията на силовата схема, прекратява се консумацията на енергия от постояннотоковия захранващ източник, а инвертирания ток дължащ се на съхранената в комутиращата индуктивност енергия се затваря през провеждалия прибор $S_1(S_2)$, товара и ограничителния диод $D_1(D_2)$. Закона по който продължава да протича тока, зависи от избрания режим и компенсацията на товара и може да бъде колебателен или апериодичен.

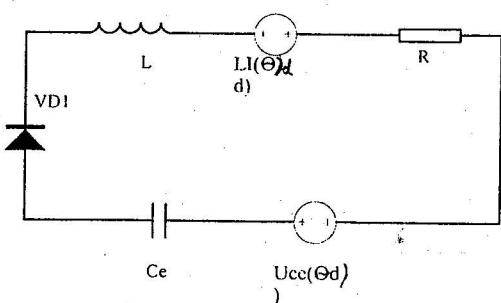
След като тока през товара се нулира, може да се подаде управляващ импулс на противофазният

прибор и процесите в схемата се повтарят. От гледна

точка на по-добър хармоничен състав на инвертирания ток следва да се предпочита

колебателното разсейване на енергията в

комутиращата индуктивност, при



фиг.3

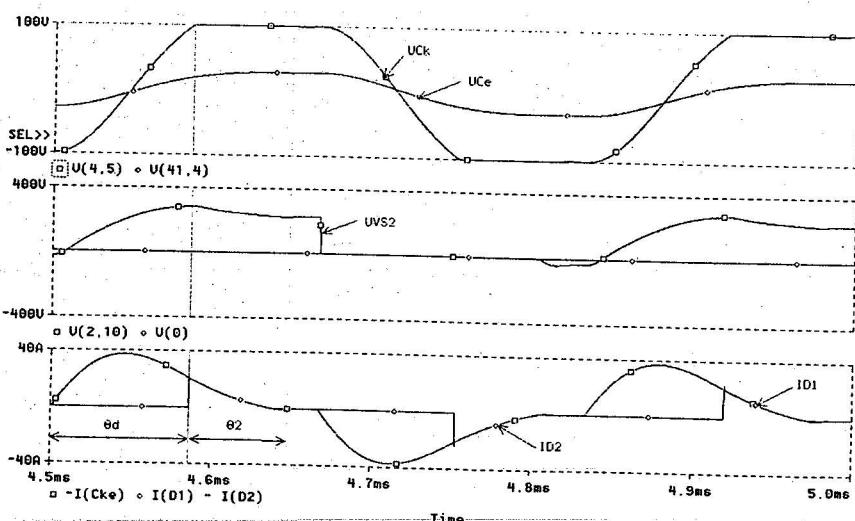
близки честоти на последователния резонансен кръг и честотата на управление.

Еквивалентната схема по която се затваря товарната верига след отпушването на ограничителния диод и промяната на конфигурацията на силовата схема е показана на фиг.3. Разликата в нея е, че когато се определя инвертирания ток в неговата втора част отсъства захранващия източник, а се добавя източник отразяваш запасената в еквивалентната комутраща индуктивност енергия. Когато се ограничава напрежението върху целия комутращ кондензатор C_k , тогава в еквивалентната схема липсва елемента отразяваш началното напрежение на товарния кондензатор - $U_{Ce}(\theta_0)$ и тока е с апериодичен характер.

В най-общия случай инвертирания ток има колебателен характер и се описва със следния израз в операторен вид:

$$I_2(p) = \frac{U_{Ce}(\theta_d) + LI_1(\theta_d)}{R + pL + \frac{1}{pC_e}}$$

След обратното преобразуване изразите за тока и напрежението на товарния кондензатор във втората част на полупериода са следните:



Фиг.4 - Времедиаграми илюстриращи работата на полумостовата схема на резонансен инвертор с ограничение на напрежението върху комутация кондензатор

$$(4) i_2(t) = -\frac{U_{CeN}}{\omega_{02}L} e^{-\delta t} \sin \omega_{02}t + I_N e^{-\delta t} \left(\cos \omega_{02}t - \frac{\delta}{\omega_{02}} \sin \omega_{02}t \right)$$

$$(5) u_{Ce}(t) = U_{CeN} e^{-\delta t} \left(\cos \omega_{02}t + \frac{\delta}{\omega_{02}} \sin \omega_{02}t \right) + \frac{I_N}{\omega_{02}C_e} e^{-\delta t} \sin \omega_{02}t,$$

където $U_{Ce}(\theta_d) = U_{CeN}$ и $I_i(\theta_d) = I_N$,

$\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{LC_e} - \delta^2}$ и $\delta = \frac{R}{2L}$ са съответно резонансната честота и

затихването на последователния резонансен кръг, $\lambda_2 = \frac{\pi \omega}{\omega_{02}} = \pi v_2$.

От принципа на действие на инвертора и като се използва факта, че при протичане на един и същи ток през гба последователни кондензатора C_k и C_e , количеството електричество което се запасява в тях е едно и също: $Q_C = C_k U_d = C_e U_x$, откъдето може да се определи стойността на напрежението върху е кондензатора C_e - $U_x = U_d \frac{C_k}{C_e}$ в края интервала $0 \div t_d$. Тогава началната стойност на напрежението U_{CeN} , при която започва вторият интервал на работа е:

$$U_{CeN} = U_x - U_{Ce}(0) = U_d \frac{C_k}{C_e} - U_{Ce}(0).$$

За определянето на началните условия $U_{ce}(0)$ и I_N се използват условията (фиг.4):

$$i_2(\theta_2) = 0$$

$$u_{Ce}(\theta_2) = -U_{Ce}(0).$$

След съвместното решаване на уравнения (4) и (5) за търсените начини условия се получават следните изрази:

$$I_N = \frac{\frac{U_{CeN}}{\omega_{02}L} \sin \theta_2}{\cos \theta_2 - \frac{\delta}{\omega_{02}} \sin \theta_2} = \frac{U_{CeN}}{\omega_{02}L} a,$$

$$U_{Ce}(0) = \frac{\frac{U_{CeN} e^{-\delta \theta_2}}{\omega_{02}}}{\frac{\sin \theta_2}{\omega_{02}} - \frac{\cos \theta_2}{\omega_{02}}} = \frac{\frac{C_k U_d}{C_e}}{1 + e^{-\delta \theta_2} \left(\frac{\delta}{\omega_{02}} \sin \theta_2 - \frac{\cos \theta_2}{\omega_{02}} \right)} = 2k_C \frac{C_k}{C_e} \frac{U_d}{2}$$

$$\text{където } a = \frac{\frac{\sin \theta_2}{\omega_{02}}}{\cos \theta_2 - \frac{\delta}{\omega_{02}} \sin \theta_2}, k_C = \frac{1}{1 + e^{-\delta \theta_2} \left(\frac{\delta}{\omega_{02}} \sin \theta_2 - \frac{\cos \theta_2}{\omega_{02}} \right)}.$$

Представени в кондензиран вид и нормирани спрямо управляващата честота ѝ изразите за инвертирания ток и напрежението на компенсиращ кондензатор са следните:

$$(6) i_2(\vartheta) = \frac{pU_d(k_C - 1)}{\omega_{02}L} e^{-\frac{\delta}{\pi}\vartheta} \sqrt{a^2 + \left(1 + a \frac{\delta}{\omega_{02}}\right)^2} \sin \frac{\pi}{\lambda_2} (\vartheta - \psi)$$

$$(7) u_{Ce}(\vartheta) = pU_d(1 - k_C)e^{-\frac{\delta}{\pi}\vartheta} \sqrt{1 + \left(a + \frac{\delta}{\omega_{02}} + a \left(\frac{\delta}{\omega_{02}}\right)^2\right)^2} \sin \frac{\pi}{\lambda_2} (\vartheta + \varphi_2),$$

където $p = \frac{C_k}{C_e}$, $\psi = \theta_2$, $\varphi_2 = \frac{\lambda_2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1}{a + \frac{\delta}{\omega_{02}} + a \left(\frac{\delta}{\omega_{02}}\right)^2}$.

По аналогичен начин, като се използват резултатите от анализа на работата на инвертора за втората част от полупериода, за инвертирания ток и напрежението на еквивалентния комутиращ кондензатор в интервала когато се черпи енергия от захранващия източник се получава:

$$(8) i_1(\vartheta) = \frac{U_d(1 + pk_C)}{\omega_{01}L} e^{-\frac{\delta}{\pi}\vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda_1} \vartheta,$$

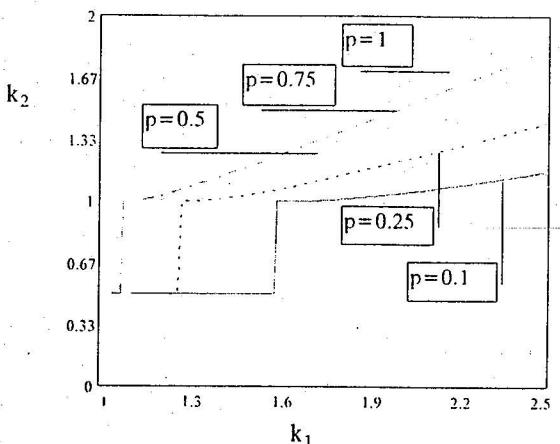
$$(9) u_C(\vartheta) = \frac{U_d}{2} - U_d(1 + pk_C) \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_{01}}\right)^2} e^{-\frac{\delta}{\pi}\vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda_1} (\vartheta + \varphi_1).$$

Като се използва факта, че последователните резонансни кръгове с резонансни честоти ω_{01} и ω_{02} имат едно и също затихване δ , се получава следната зависимост между техните коефициенти на разколебаване k_1 и k_2 :

$$(10) \left(\ln \frac{k_2}{k_2 - 1}\right)^2 = \frac{(p+1) \left(\ln \frac{k_1}{k_1 - 1}\right)^2}{p - \frac{1}{\pi^2} \left(\ln \frac{k_1}{k_1 - 1}\right)^2}, \text{ където } k_1 = \frac{1}{e^{-\frac{\delta\pi}{\delta\pi}}}, k_2 = \frac{1}{e^{-\frac{\delta\pi}{\delta\pi}}}.$$

Тази зависимост е построена на фиг.5, която показва областта за която се изпълняват условията за резонанс ($k_2 > 1$) във втората част на полупериода.

За проектирането на инвертора се налага да бъдат определени ъглите на пропускане на управляемите ключове и диодите. От гледна точка на добри енергийни показатели и хармоничен състав на инвертирания ток е необходимо продължителността на първата част на полупериода да бъде близка до стойността съответстваща на ъгъла λ_1 . От друга страна отново от гледна точка на добър хармоничен



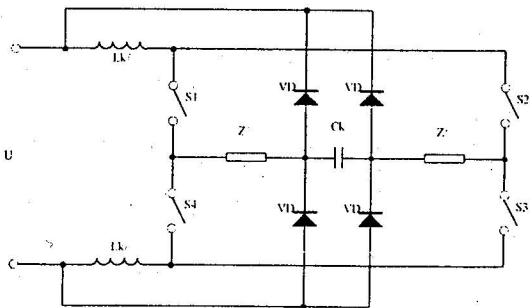
фиг.5

момента съотвестващ на ъгъл θ_d :

$$\frac{\omega_{01}}{\omega_{02}} \frac{\frac{p \sin \pi \theta_2}{\lambda_2}}{(1+p) \left(\frac{k_2 - 1}{k_2} \right)^{\frac{\theta_2}{\lambda_2}} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{k_2}{k_2 - 1} \right) \sin \pi \frac{\theta_2}{\lambda_2} - \cos \pi \frac{\theta_2}{\lambda_2}} = \left(\frac{k_1 - 1}{k_1} \right)^{\frac{\theta_d}{\lambda_1}} \sin \pi \frac{\theta_d}{\lambda_1}.$$

От това уравнение може да бъде определен ъгъла на провеждане на

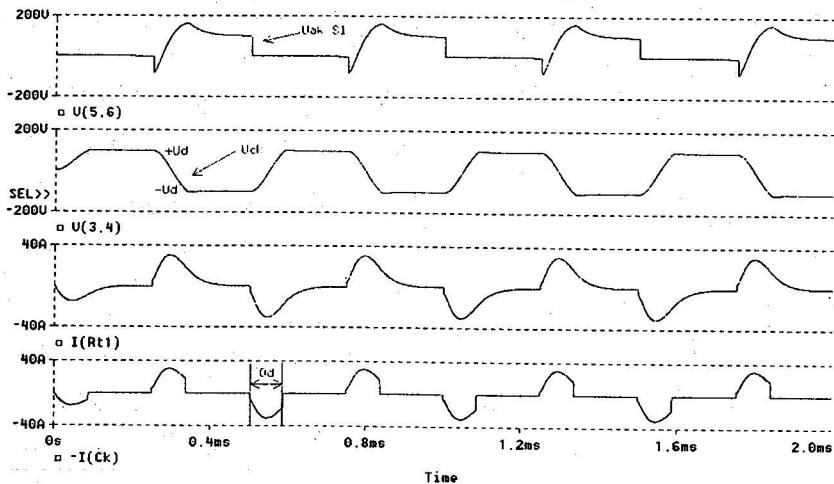
диодите в относителни единици $\frac{\theta_2}{\lambda_2}$ от коефициента на разколебаване k_1 , при параметър предварително избрани стойности за $\frac{\theta_d}{\lambda_1}$ (съобразенията за избора на които бяха изказани по-горе) и за различни стойности на



фиг.6

съотношението между C_k и C_e .

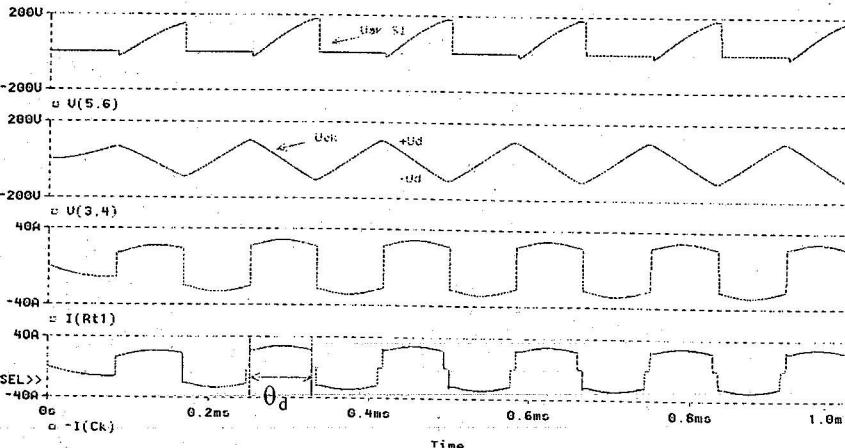
Изборът на честота на провеждане на приборите $\lambda = \theta_d + \theta_2$, трябва да е такъв, че да се изпълнява условието: $\lambda \leq \pi$.



фиг.7

Извършения анализ е приложим и за случая на комплексен товар, при работа близко до резонанс на паралелния товарен кръг и граничен режим.

При по големи мощности се използва мостова схема на РИ с ограничение на напрежението върху C_k , като например показаната на



фиг.8

фиг.6 за която авторите имат претенции за нова схемна конфигурация. Времедиаграмите на работа на тези схеми при активен товар и естествена комутация са показани на фиг.7

Тези схеми могат да работят в режими с естествена и принудителна комутация (инвертор на ток). Анализа и проектирането на представените схеми на резонансни инвертори с подобрени характеристики може да бъде извършен като се използва единния подход за анализ на резонансни инвертори представен в [3], като се отчетат специфичните особености при резонанс или капацитивна разстройка на товара.

На фиг.8 са показани времедиаграмите на напрежението върху ключа, напрежението върху комутиращия кондензатор, тока през товара и тока през комутиращия кондензатор, когато РИ работи в режим с принудителна комутация.

Особеност на предложената схема е, че товара трябва да бъде разделен на две еднакви половини (специален индуктор съставен от две галванично изолирани помежду си навивки или товар приведен чрез съгласуваш инверторен трансформатор с две първични намотки, които се свързват с помощта на комутиращ кондензатор.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тодоров Т. С., Маджаров Н. Д., Алексиев Д. Т., Иванов П. Т., Автономни инвертори, Габрово, 1996.
2. Григорова Ц. Автoreферат на дисертация на тема: "Резонансни инвертори с ограничителни диоди", Пловдив, 2000.
3. Хинов Н. А., Н. П. Градинаров. Анализ на автономни резонансни инвертори с принудителна комутация. *Сборник доклади на Шестата национална научно-приложна конференция с международно участие „Електронна техника - ЕТ'97“ 24-27 септември 1997г.*, гр. Созопол, 61-67.
4. Градинаров Н. П., Н. Хинов. Анализ на автономни резонансни инвертори с комплексен товар. *Сборник доклади на Шестата национална научно-приложна конференция с международно участие „Електронна техника - ЕТ'97“ 24-27 септември 1997г.*, гр. Созопол, 68-73.
5. Арнаудов Д, Н. Хинов, Н. П. Градинаров. Последователни резонансни инвертори с ограничение на напрежението на комутиращия кондензатор. *Сборник доклади на XXX научна конференция с международно участие „Комуникационни електронни и компютърни системи‘2000“, гр. София, 2000, 234-239.*