

АНАЛИЗ И ПРОЕКТИРАНЕ НА РЕЗОНАНСЕН ИНВЕРТОР С
ОБРАТНИ ДИОДИ

Доц.д-р инж. Никола ГРАДИНАРОВ, инж. Николай ХИНОВ
Технически университет - София
Камеадра "Силова електроника"

The paper presents new formulas for determining the load current and the voltage of the commutative capacitor. The results are obtained by using the coefficient of the hesitation of series-resonant circuit - k and the corresponding to it parameter of the resonance inverters with reverse diodes - k_{od} . The results facilitate the determination of all necessary parameters for the design of such inverters.

Предимствата на резонансните инвертори с обратни диоди (РИОД) в сравнение с бездиодните при захранване на Електромеханични устройства (ЕТУ) за различни електромеханически извършвани: безпроблемен пуск, ниски прости напрежения върху приборите, възможност за лесна настройка при работа с непознати товари и обслужване от нискоквалифициран персонал. Повишаването на честотните им възможности благодарение на създаваните нови прибори тиристор-обратен диод прави тези инвертори перспективни и актуални.

Тези инвертори са анализирани в литературата [А1, А2, А3, А4] и въз основа на тях са създавани методики за тяхното проектиране. Известните анализи обаче са или много сложни и трудно дават представа за характера на протичащите процеси или са свързани с допусканятия, които водят до значителни грешки.

Тук се предлага един подход за анализ и свързана с него методика, които отстраняват посочените по горе слабости.

На фиг.1 е показана схемата на последователен РИОД при активен товар. За анализирането му се използва еквивалентната схема в операторен вид показана на фиг.2.

Уравнението за баланса на напреженията в операторен вид има вида :

$$(1) \quad \frac{Ed}{p} = (R + pL + \frac{1}{pC})I(p) - L I_0 - \frac{U_0}{p}, \text{ където}$$

I_0 и U_0 отразяват началните условия в схемата, R е товарното съпротивление, L и C са комутационните индуктивност и капацитет, E_d е захранващото напрежение, а $I(p)$ е образа на общия ток в контура.

Камо решим уравнение (1) относно $I(p)$ и камо се вземе предвид, че е изпълнено условието за резонансен процес $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, за оригиналата на тока се получава израза:

$$(2) \quad i(t) = \frac{U_d + U_0}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t - I_0 e^{-\delta t} \left(\frac{\delta}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \cos \omega_0 t \right), \text{ където}$$

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$ е резонансната честота на трептящия кръг, а $\delta = \frac{R}{2L}$ е неговото затихване.

Израза за $u_c(t)$ е следния:

$$(3) \quad u_c(t) = U_d - (U_d + U_0) e^{-\delta t} \left(\frac{\delta}{\omega_0} \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t \right) + \frac{I_0}{\omega_0 C} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t$$

Ом съвместното решаване на (2) и (3) камо са използвани условията за периодичност на тока през твора и напрежението на комутиращия кондензатор (при режим на непrekъснат мок) фиг.3 т.е.

$i(\frac{\pi}{\omega}) = -I_0$ и $u_c(\frac{\pi}{\omega}) = U_0$ се определят стойностите на началния ток и напрежение - $U_0 = (2k_{od} - 1) U_d$ и $I_0 = \frac{2k_{od} U_d}{\omega_0 L} a$, къдемо

$k_{od} = \frac{1}{1 - h \cdot e^{\frac{-\delta\pi}{\omega}}} = \frac{1}{1 - h \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{v}}}$ е величина характеризираща резонансния процес

в колебателната верига, аналог на коефициента на разколебаване k въведен при резонансните инвертори без обратни диоди, ω - управляващата честота, $v = \frac{\omega}{\omega_0}$ е коефициент на прекъснатост, а с h е означено:

$$h = \frac{\frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{k}{k-1} \right) \sin \frac{\pi}{v} + \cos \frac{\pi}{v} + \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{v}}}{\left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{v}} \left(\frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{k}{k-1} \right) \sin \frac{\pi}{v} - \cos \frac{\pi}{v} \right) - 1}$$

Коефициентът a се определя от следния израз

$$a = \frac{\sin \frac{\pi}{v}}{\frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{k}{k-1} \right) \sin \frac{\pi}{v} - \cos \frac{\pi}{v} - \left(\frac{k}{k-1} \right)^{\frac{1}{v}}},$$

а коефициентът на разколебаване k е от вуга $k = \frac{1}{1 - e^{\frac{-\delta\pi}{\omega_0}}}.$

След заместване на началните ток и напрежение в изрази (2) и (3), ме добивам следния кондензиран вуг:

$$(4) \quad i(t) = \frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2 e^{-\delta t}} \sin(\omega_0 t + \psi') ,$$

$$(5) \quad u_c(t) = U_d - 2k_{od}U_d \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} - a - a \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \varphi') , \text{ където}$$

$$\psi' = \operatorname{arctg} \frac{a}{1 - a \frac{\delta}{\omega_0}}, \text{ а } \varphi' = \operatorname{arctg} \frac{1}{\frac{\delta}{\omega_0} - a - a \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2} .$$

При по-нататъшния анализ на схемата е удобно да се извърши нормиране на тъгъла на провеждане на тиристорите $\lambda = \frac{\pi \omega}{\omega_0}$ спрямо управляващата честота ω , при което изразите за $i(\vartheta)$ и $u_c(\vartheta)$ придобиват вида:

$$(6) \quad i(\vartheta) = \frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2 e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega}}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) \text{ и}$$

$$(7) \quad u_c(\vartheta) = U_d - 2k_{od}U_d \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} - a - a \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \varphi) ,$$

$$\text{където } \vartheta = \omega t, \psi = \frac{\lambda}{\pi} \vartheta \text{ и } \varphi = \frac{\lambda}{\pi} \varphi .$$

Средната стойност на тока през тиристорите се определя с интеграла:

$$I_{tar} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\lambda - \psi} i(\vartheta) d\vartheta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\lambda - \psi} \frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2 e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega}}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) d\vartheta , \text{ и след}$$

неговото решаване е:

$$(8) \quad I_{tar} = \frac{\frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2}}{2\pi \sqrt{\left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2}} \left(e^{-\frac{\delta(\lambda - \psi)}{\omega}} \sin \alpha + \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \psi + \alpha \right) \right), \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\frac{\pi}{\lambda}}{\frac{\delta}{\omega}} .$$

Средният ток консумиран от захранващия източник се намира аналогично:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i(\vartheta) d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2 e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega}}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) d\vartheta$$

$$(9) \quad I_d = -\frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1-a\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} \frac{e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \sin\left(\frac{\pi}{\lambda}(\pi+\psi)+\alpha\right) - \sin\left(\frac{\pi}{\lambda}\psi+\alpha\right)}{\pi \sqrt{\left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2}}$$

Средният ток през диодите се определя от израза:

$$(10) \quad I_{dav} = I_{tav} - \frac{I_d}{2}$$

Максималната стойност на напрежението върху комутиращия кондензатор, се получава като израза за u_C - (7) се изчисли за $\vartheta = \lambda - \psi$ и е:

$$(11) \quad u_{C_{max}} = U_d - 2k_{od}U_d \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} - a - a\left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} e^{-\delta\frac{\lambda-\psi}{\omega}} \sin\frac{\pi}{\lambda}(\lambda - \psi + \varphi)$$

Схемното време за възстановяване в установен режим е:

$$(12) \quad t_{qc} = \frac{\pi + \psi - \lambda}{\omega_0}$$

От принципа на действие на схемата е ясно, че минималното време за възстановяване се получава след първия полупериод и то е следното - $t_{qc\min} = \frac{\pi}{\omega} - \frac{\pi}{\omega_0}$ и следва да се вземе предвид за осигуряване на безпроблемен пуск.

Външната характеристика на РИОД при активен товар при режим на непрекъснат ток се дава с израза:

$$U_T = R_T \frac{I_{T_{max}}}{\sqrt{2}}, \text{ където } I_{T_{max}} \text{ се определя от израза (6) за } \vartheta = \frac{\lambda}{2} - \psi \text{ и има}$$

вига:

$$(13) \quad U_T = 2\sqrt{2}k_{od}U_d \frac{\delta}{\omega_0} e^{-\delta\frac{\lambda-\psi}{\omega}} \sqrt{\left(1-a\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2}$$

Направеният анализ позволява да бъде проектиран последователен РИОД работещ в режим на прекъснат ток, като в този случай в приведените по горе изрази се положи $\psi=0$.

При проектиране обикновено се задават - Изходната мощност P , $\cos\phi_T$, захранващото напрежение U_d , ефективната стойност на товарното напрежение U_T , изходната честота f .

Редът за проектиране при активен товар е следният:

Задават се стойности на k и v . Съобразенията за избора на тези стойности са следните: за k се избира препоръчваните за резонансните инвертори стойности от $1.2 \div 1.8$, 2. Коефициентът на прекъснатост v се избира в зависимост от класа на приборите по време за възстановяване. От енергетична гледна точка за предпочитане е той да

е близък до 1. Това дава възможност да се определят комутиращите елементи, а също така и ъглите ψ и φ . От тук нататък след заместване в приведените по горе изрази (8) \div (12), всички основни величини участвуващи в проектирането на инвертора.

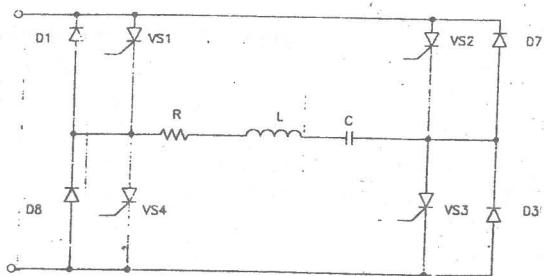
Съгласуването на инвертора с товара се извършва по един от трите познати начина: с помощта на инверторен трансформатор, директно свързване или чрез използване на усложнена изходна верига.

При активно-индуктивен характер на товара разгледаната методика също може да се използва, като товарната индуктивност се включва към комутиращата. При реалните товари, които са с много нисък софт се практикува компенсация и работа на честота близка до резонансната на кръга.

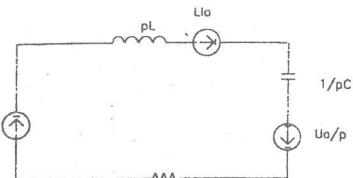
Изложената методика позволява да бъде проектиран РИОД и при другите възможни схемни варианти (с разделен захранващ източник и с нулев извод на инверторния трансформатор), като се използват известните числови кофициенти [Л1], свързващи токовете и напреженията в тях с тези в разгледаната мостова схема.

ЛИТЕРАТУРА:

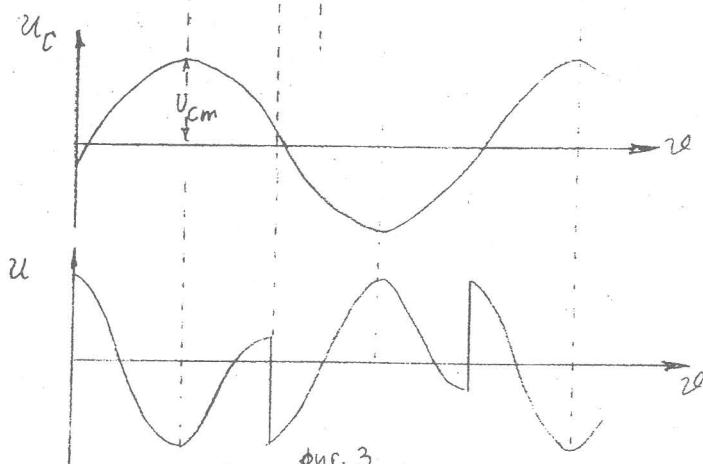
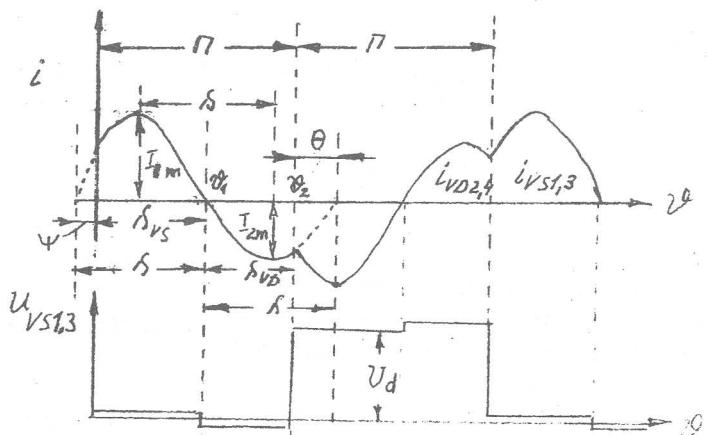
1. Беркович Е. И., Г. В. Ивенский и др., "Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок", Энергоатомиздат, Ленинград, 1983 г.
2. Бобчева М. А., П. Тр. Горанов и др., "Ръководство за проектиране на силови електронни устройства", Техника, София, 1991 г.
3. Brichant F., "L'ondistor", Dunod, Paris, 1974.
4. Начев Н., Г. Ю. Малеев, "Силова електроника", Техника, София, 1979 г.



фиг. 1



фиг. 2



фиг. 3