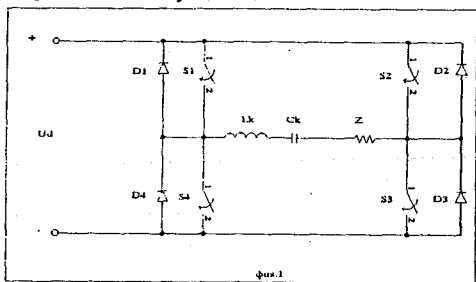


АНАЛИЗ НА РЕЗОНАНСЕН ИНВЕРТОР С ОБРАТНИ ДИОДИ ПРИ КОМПЛЕКСЕН ТОВАР

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

The paper presents analysis of inverters with reverse diodes operating in a regime of induced commutation, at complex load. The usage of convenient transformations of the load circuit and general hesitation coefficient for the inverters with reverse diodes makes possible the derivation of good functional relations for all parameters necessary in the design of such inverters.

Резонансните инвертори с обратни диоди (РИОД) са се наложили като едни от най-често използваните за захранване на Електротехнологични устройства (ЕТУ) за различни електротехнологии със своите предимства: безпроблемен пуск, ниски прави напрежения върху приборите, възможност за лесна настройка при работа с непознати товари и обслужване от нискоквалифициран персонал. Създаването на все по-мощни и бързи транзистори и тиристори способства за повишаването на честотните им възможности и прави тези инвертори переспективни и актуални, а това налага тяхното анализиране при най-често срещания в практиката случай на комплексен товар.



Тези инвертори са анализирани в литературата [Л3, Л4, Л5] и въз основа на тях са създадени методики за тяхното проектиране. Известните анализи обаче са или много сложни и трудно дават представа за характера на протичащите процеси или са свързани с допускания, които

водят до значителни грешки.

Тук се предлага един подход за анализ, аналогичен на анализа на тези инвертори при активен товар [Л1], където се отстраняват посочените по горе слабости.

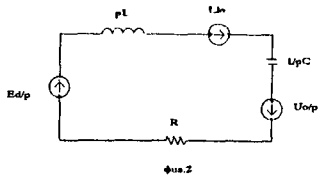
На фиг.1 е показана схемата на последователен мостов РИОД при комплексен товар. В литературата [Л2] е показано, че всеки товарен кръг може да се представи по първи хармоник на инвертирания ток като последователно съединение на активна $R_{(1)}$ и реактивна съставка $X_{(1)}$. Знака на $X_{(1)}$ определя вида на разстройката

на товарния кръг. За анализирането му се използва еквивалентната схема в операторен вид показана на фиг.2.

Уравнението за баланса на напреженията в операторен вид при работа на РИОД в по-често използвания в практиката режим на непрекъснат ток има вида :

$$(1) \quad \frac{E_d}{r} = (R + pL) \cdot \frac{I(p)}{r} + U_0 + U_{0C}$$

където I_0 и U_0 отразяват началните условия в схемата, $R=R_{(1)}$ е еквивалентното товарно съпротивление, L и C са еквивалентните комутиращи индуктивност и капацитет, E_d е захранващото напрежение, а $I(p)$ е образа на общия ток в контура.



Като се реши уравнение (1) относно $I(p)$ и като се вземе предвид, че е изпълнено условието за резонансен процес

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ за оригинала на тока се получава}$$

израза:

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

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 :

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

От съвместното решаване на (2) и (3) като са използвани условията за периодичност на тока през товара и напрежението на комутиращия кондензатор (при режим на непрекъснат ток) фиг.3 т.е.

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

$$k_{od} = \frac{1}{1 - h \cdot e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}}} = \frac{1}{1 - h \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{\nu}}}$$

процес в колебателната верига наречена коефициент на разколебаване при резонансните инвертори с обратни диоди, аналог на коефициента на разколебаване k въведен при резонансните инвертори без обратни

диоди, ω е управляващата честота, $v = \frac{\omega}{\omega_0}$ е коефициент на прекъснатост, а с h и a са означени:

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

Коефициента на разколебаване k е от вида $k = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\delta\pi}{\omega_0}}}$.

След заместване на началните ток и напрежение в изрази (2) и (3), те добиват следния кондензиран вид:

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

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

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

При по-нататъшния анализ на схемата е удобно да се извърши нормиране на ъгъла 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:

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

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

където $\vartheta = \omega t$, $\psi = \frac{\lambda}{\pi} \psi'$ и $\varphi = \frac{\lambda}{\pi} \varphi'$.

Средната стойност на тока през приборите се определя с интеграла:

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

неговото решаване е:

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

$$\text{където } F = \sqrt{\left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2} \text{ и } \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\frac{\pi}{\lambda}}{\frac{\delta}{\omega}}.$$

Средният ток консумиран от захранващия източник се намира аналогично:

$$(9) \quad I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i(\vartheta) d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi)} d\vartheta$$

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

Средният ток през диодите се определя от израза:

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

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

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

Схемното време за възстановяване на приборите 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 - $t_{qcmin} = \frac{\pi}{\omega} - \frac{\pi}{\omega_0}$ и следва да се вземе предвид за осигуряване на безпроблемен пуск.

За да се определи външната характеристика на РИОД при комплексен товар при режим на непрекъснат ток е необходимо да се направи хармоничен анализ на инвертирания ток.

Косинусоидалната $a_{(1)}$ и синусоидалната $b_{(1)}$ съставки на максималната стойност на първия хармоник на инвертирания ток са съответно:

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2k_{\text{од}} U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \psi} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) \cos \vartheta d\vartheta =$$

$$= \frac{B}{\pi A} \left(e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \pi} \left(C \cos \left(\frac{\pi^2}{\lambda} + \psi' \right) + D \sin \left(\frac{\pi^2}{\lambda} + \psi' \right) \right) + C \cos \psi' + D \sin \psi' \right),$$

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2k_{\text{од}} U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \psi} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) \sin \vartheta d\vartheta =$$

$$= \frac{B}{\pi A} \left(e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \pi} \left(H \sin \left(\frac{\pi^2}{\lambda} + \psi' \right) + G \cos \left(\frac{\pi^2}{\lambda} + \psi' \right) \right) + H \sin \psi' + G \cos \psi' \right),$$

където

$$A = \left(\left(\frac{\pi + \lambda}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right) \left(\left(\frac{\pi - \lambda}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right), B = \frac{2k_{\text{од}} U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2},$$

$$C = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\pi^2 - \lambda^2}{\lambda^2} + \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right), D = \frac{2\delta}{\omega} \left(\frac{\pi^2 + \lambda^2}{\lambda^2} + \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right), H = 2 \left(\left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 - \frac{\pi^2 - \lambda^2}{\lambda^2} \right), G = \frac{4\pi \delta}{\lambda \omega}.$$

Максималната стойност на първият хармоник на товарният ток се получава с израза:

$$(13) I_{(1)\text{max}} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2},$$

Максималната стойност на товарното напрежение е:

$$(14) U_{\Gamma\text{max}} = I_{(1)\text{max}} Z_{(1)} = \frac{\left(\sqrt{a_1^2 + b_1^2} \right) R_{(1)}}{\cos \gamma}, \text{ където } \gamma = \arctg \frac{X_{(1)}}{R_{(1)}} \text{ е ъгъл}$$

отразяващ разстройката на товарния кръг.

Ефективната стойност на товарното напрежение, ако се приеме че то е със синусоидална форма е:

$$(15) U_{\Gamma} = \frac{U_{\Gamma\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

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

Съображенията за избора на k и ν са следните: за k се избира препоръчаните за резонансните инвертори стойности от $1.2 \div 1.8$, а коефициентът на прекъснатост ν 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.

Необходимостта от повишаване на стойността на товарното напрежение при РИОД, налага съгласуването на инвертора с товара

да се извърши с помощта на инверторен трансформатор или чрез използване на усложнена изходна верига.

Изложеният анализ може да бъде използван и при другите възможни схемни варианти на РИОД (с разделен захранващ източник и с нулев извод на инверторния трансформатор), като се използват известните числови коефициенти [Л4], свързващи токовете и напреженията в тях с тези в разгледаната мостова схема.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Градинаров Н.П., Н. Хинов "Анализ и проектиране на резонансен инвертор с обратни диоди" Сборник доклади на Петата национална научно-приложна конференция с международно участие "Електронна техника - ЕТ'96" 27-29 септември 1996 г., гр. Созопол.

2. Н. Хинов, Градинаров Н.П. "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.

3. Тодоров Т. С и др., "Автономни инвертори", ТУ-Габрово, Габрово, 1996г.

4. Беркович Е. И., Г. В. Ивенский и др., "Туристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок", Энергоатомиздат, Ленинград, 1983 г.

5. Brichant F., "L'ondistor", Dunod, Paris, 1974.