

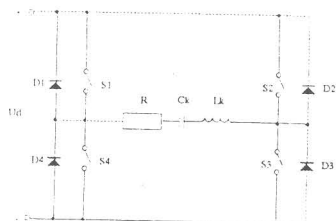
АНАЛИЗ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛНИ РЕЗОНАНСНИ RLC ИНВЕРТОРИ С ОБРАТНИ ДИОДИ ПРИ РАБОТА С НАДРЕЗОНАНСНА ЧЕСТОТА

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

Abstract

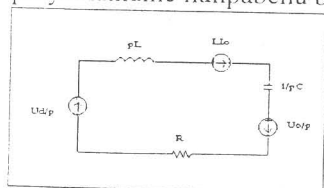
The paper presents new formulas for determining the load current and the voltage of the capacitor. The results are obtained by using the coefficients k and v . The results facilitate the determination of all necessary parameters for the design of such inverters. The experimental results and the results received by the computing simulation are close to the theoretical ones.

Използването на пълноуправляеми прибори в резонансните инвертори с обратни диоди (РИОД), дава възможност схемите да работят в режими с честота на управление както под резонансната на еквивалентната последователна RLC верига, така и при честота на управление над резонансната.



фиг.1

Предмет на настоящата работа е анализа на тези инвертори при активен товар. В случаите, когато е необходимо за съгласуване на параметрите на инвертора и товара да се използват усложнени изходни вериги, за привеждането им към базовата последователна RLC верига могат да се използват преобразуванията и резултатите направени в [2,3].



фиг.2

При анализирането на резонансни RLC инвертори с обратни диоди и честота на управление над резонансната се използва подходът приложен при анализа на последователни RLC инвертори с обратни диоди, работещи в апериодичен режим [1].

На фиг.1 е показана схемата на последователен мостов РИОД. За анализирането му се използва

еквивалентната схема в операторен вид показана на фиг.2. Уравнението за баланса на напреженията в операторен вид е:

$$(1) \quad \frac{U_d}{p} = (R + pL_k + \frac{1}{pC_k})I(p) + L_k I_0 - \frac{U_0}{p},$$

където I_0 и U_0 отразяват началните условия в схемата, R е товарното съпротивление, L_k и C_k са комутираща индуктивност и

комутирац капацитет, U_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 т.е. $R < 2\sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$, за оригинала на тока се получава израза:

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

където $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k} - \delta^2}$ е резонансна честота, а $\delta = \frac{R}{2L_k}$ - затихване

на последователната резонансна RLC верига.

Израза за напрежението на кондензатора $u_{Ck}(t)$ е следния:

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

По аналогия с анализа на последователни РИОД, работещи с честота на управление ω под резонансната честота на последователния кръг, при анализа на последователни РИОД, работещи с честота на управление по-висока от резонансната се въвеждат коефициентите:

$$- k = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\delta \pi}{\omega_0}}} - \text{коефициент на разколебаване};$$

$$- v = \frac{\omega}{\omega_0} - \text{честотен коефициент.}$$

От съвместното решаване на изрази (2) и (3) като са използвани условията за периодичност на тока през товара и напрежението на кондензатора 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 - $I_0 = \frac{2K_p U_d}{\omega_0 L_k} a_p$ и $U_0 = (2K_p - 1) U_d$, където

$$K_p = \frac{1}{1 - h_p e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}}} = \frac{1}{1 - h_p \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{v}}} \quad \text{е} \quad \text{величина} \quad \text{характеризираща}$$

последователната RLC верига, наречена коефициент на разколебаване при РИОД, работещи на надрезонансна честота, а с h_p и a_p са означени:

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

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

$$(4) \quad i(t) = \frac{2K_p U_d}{\omega_0 L_k} \sqrt{\left(1 + a_p \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a_p^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t - \psi'_p),$$

$$(5) \quad u_{ck}(t) = U_d - 2K_p U_d \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} + a_p + a_p \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \varphi'_p), \text{ където}$$

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

При по-нататъшния анализ на схемата е удобно да се извърши нормиране спрямо управляващата честота ω , при което изразите за $i(\theta)$ и $u_{ck}(\theta)$ придобиват вида :

$$(6) \quad i(\theta) = \frac{2K_p U_d}{\omega_0 L_k} \sqrt{\left(1 + a_p \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a_p^2} e^{-\frac{\delta \theta}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\theta - \psi_p) \text{ и}$$

$$(7) \quad u_{ck}(\theta) = U_d - 2K_p U_d \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} + a_p + a_p \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} e^{-\frac{\delta \theta}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\theta + \varphi_p),$$

$$\text{където } \theta = \omega t, \quad \lambda = \frac{\pi \omega}{\omega_0}, \quad \psi_p = \frac{\lambda}{\pi} \psi'_p \text{ и } \varphi_p = \frac{\lambda}{\pi} \varphi'_p.$$

От израз (6) се установява, че при ъгъла $\theta = \psi_p$, товарния ток се нулира.

Максималната стойност на товарния ток се получава при ъгъла

$$\theta_m = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\frac{\lambda}{\delta}}{\frac{\omega_0}{\omega}} + \psi_p \text{ и е:}$$

$$(8) \quad I_{\max} = i(\theta_m) = \frac{2K_p U_d}{\omega_0 L_k} \sqrt{\left(1 + a_p \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a_p^2} e^{-\frac{\delta \theta_m}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\theta_m - \psi_p).$$

Средната стойност на тока през ключовете се определя с интеграла:

$$I_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi_p}^{\pi} i(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi_p}^{\pi} \frac{2K_p U_d}{\omega_0 L_k} \sqrt{\left(1 + a_p \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a_p^2} e^{-\frac{\delta \theta}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\theta - \psi_p) d\theta, \text{ и след}$$

неговото решаване е :

$$(9) \quad I_{av} = -\frac{2K_p U_d D}{2\pi \omega_0 L_k F} \left(e^{-\frac{\delta}{\omega} \pi} \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{\lambda} (\pi - \psi_p)\right) - e^{-\frac{\delta}{\omega} \psi_p} \cos \alpha \right),$$

$$\text{където } D = \sqrt{\left(1 + a_p \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a_p^2}, F = \sqrt{\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} \text{ и } \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{\delta} \frac{\pi}{\omega}.$$

Средният ток консумиран от захранващия източник се намира с израза:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i(\theta) d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2K_p U_d}{\omega_0 L_k} \sqrt{\left(1 + a_p \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a_p^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\theta - \psi_p) d\theta,$$

$$(10) \quad I_d = -\frac{2K_p U_d D}{\pi \omega_0 L_k F} \left(e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}} \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{\lambda} (\pi - \psi_p) \right) - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda} \psi_p \right) \right).$$

Средният ток през диодите се определя от израза:

$$(11) \quad I_{d,av} = I_{av} - \frac{I_d}{2}.$$

Максималната стойност на напрежението върху кондензатора, се получава в момента ψ_p и е:

$$(12) \quad U_{Ck \max} = u_{Ck}(\psi_p) = U_d - 2K_p U_d \sqrt{\left(\frac{\delta}{\omega_0} + a_p + a_p \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} + 1 e^{-\frac{\delta \psi_p}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\psi_p + \varphi_p).$$

Ефективната стойност на товарния ток е:

$$(13) \quad I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\theta) d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{2K_p U_d}{\omega_0 L_k} \sqrt{\left(1 + a_p \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a_p^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\theta - \psi_p) \right)^2 d\theta} =$$

$$= \frac{K_p U_d D}{\omega_0 L_k} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{F} \left(e^{-4\pi \frac{\delta}{\omega}} \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{\lambda} (4\pi - 2\psi_p) \right) - \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda} 2\psi_p \right) \right) + \frac{\omega}{\delta} \left(e^{-4\pi \frac{\delta}{\omega}} - 1 \right) \right)}.$$

За ефективната стойност на товарното напрежение се получава:

$$(14) \quad U = \frac{2K_p \delta U_d D}{\omega_0} E, \text{ където}$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{F} \left(e^{-4\pi \frac{\delta}{\omega}} \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{\lambda} (4\pi - 2\psi_p) \right) - \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda} 2\psi_p \right) \right) + \frac{\omega}{\delta} \left(e^{-4\pi \frac{\delta}{\omega}} - 1 \right) \right)}.$$

Получените изрази могат да бъдат в основата на инженерна методика за проектиране на РИОД, работещи на надрезонансна честота.

Направения анализ, позволява построяването на товарните характеристики на разглежданите резонансни инвертори. За тази цел определените по-горе величини се преобразуват в относителни единици. Така например за консумирания от захранващия източник ток в относителни единици I'_d се получава:

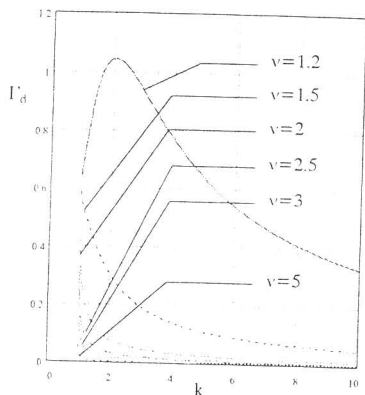
$$(14) \quad I'_d = \frac{I_d}{I_0} = \frac{I_d}{\omega C_k U_d} = -\frac{2K_p D}{\pi v F} \left(1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} \right)^2 \right) \left(e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}} \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{\lambda} (\pi - \psi_p) \right) - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda} \psi_p \right) \right).$$

На фиг.3 е показана зависимостта на консумирания от захранващия източник ток в относителни единици I'_d от коефициента на разколебаване k и честотния коефициент v .

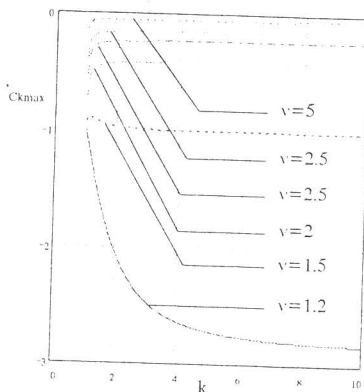
Израза за максималното напрежение на комутационния кондензатор в относителни единици $U'_{C_{\max}}$ е:

$$(15) \quad U'_{C_{\max}} = \frac{U_{C_{\max}}}{U_d} = 1 - 2K_p \sqrt{\left(\frac{\delta}{\omega_0} + a_p + a_p \left(\frac{\delta}{\omega_0} \right)^2 \right)^2} + 1 e^{-\frac{\delta \psi_p}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\psi_p + \varphi_p).$$

Зависимостта на максималното напрежение на комутационния



фиг.3



фиг.4

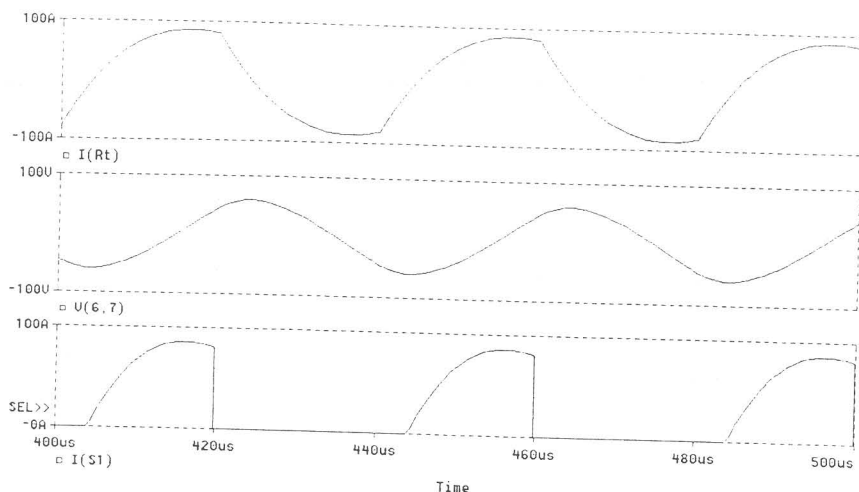
кондензатор в относителни единици $U'_{C_{\max}}$ от коефициентите k и v е показана на фиг.4.

По подобен начин могат да се определят и построят и останалите товарни характеристики на тези инвертори.

От построените товарни характеристики на РИОД, работещи на надрезонансна честота е ясно, че с повишаването на работната честота, консумираната мощност намалява, за разлика от работата на РИОД на подрезонансна честота.

На фиг.5 са представени резултати от компютърни симулации (последователно отгоре надолу са показани товарния ток, напрежението

на комутиращия кондензатор и тока през ключа) за работа на РИОД с надрезонансна честота.



фиг.5

Чрез използването на подходящи числови коефициенти резултатите от анализа на мостовата схема, могат да бъдат разпространени и за другите схемни разновидности на последователни RLC инвертори.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хинов Н., Градинаров Н.П. “Анализ на последователни RLC инвертори с обратни диоди при работа в аperiодичен режим” Сборник доклади на Седмата национална научно-приложна конференция с международно участие “Електронна техника - ET'98” 23-25 септември 1998г., гр. Созопол.

2. Хинов Н. А., Н. П. Градинаров, 1998, “Товарни характеристики на резонансни инвертори с усложнена изходна верига - I част”, *Сборник доклади на XXXIII научна сесия “Комуникационни, електронни и компютърни системи'98”*, София, 168-172.

3. Хинов Н. А., Н. П. Градинаров, 1998, “Товарни характеристики на резонансни инвертори с усложнена изходна верига - II част”, *Сборник доклади на XXXIII научна сесия “Комуникационни, електронни и компютърни системи'98”*, София, 173-178.