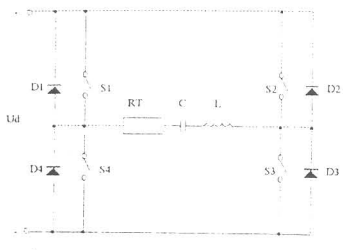


АНАЛИЗ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛНИ RLC ИНВЕРТОРИ С  
ОБРАТНИ ДИОДИ ПРИ РАБОТА В АПЕРИОДИЧЕН РЕЖИМ  
инж. Николай ХИНОВ, Доц.г-р инж. Никола ГРАДИНАРОВ  
Технически университет - София, Катедра "Силова електроника"

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  $k_A$  and  $v_A$ . 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.

Автономните последователни RLC инвертори, работещи в резонансен режим са широко използвани като източници на високочестотна енергия. На практика обаче аperiодичните режими също са възможни при определени условия, поради което се налага да бъде направен анализ на последователни RLC инвертори и в този случай.



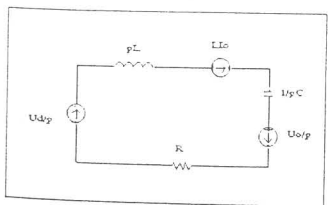
фиг.1

инвертори с обратни диоди [1], както и разглежданията дадени в [2].

На фиг.1 е показана схемата на последователен мостов RLC инвертор с обратни диоди, работещ в аperiодичен режим. За анализирането му се използва еквивалентната схема в операторен вид показана на фиг.2.

Уравнението за баланса на напреженията в операторен вид има вида :

$$(1) \quad \frac{U_d}{p} = (R + pL + \frac{1}{pC})I(p) + LI_0 - \frac{U_0}{p},$$



фиг.2

При анализирането на последователни RLC инвертори с обратни диоди се използва подходящ приложен при анализа на резонансни

където  $I_0$  и  $U_0$  отразяват началните условия в схемата,  $R$  е товарното съпротивление,  $L$  и  $C$  са индуктивност и 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 аperiодичен процес т.е.

$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ , за оригинала на тока се получава изрза:

$$(2) \quad i(t) = \frac{U_d + U_0}{\Omega L} e^{-\delta t} \text{sh}\Omega t - I_0 e^{-\delta t} \left( \text{ch}\Omega t - \frac{\delta}{\Omega} \text{sh}\Omega t \right),$$

където  $\Omega = \sqrt{\delta^2 - \frac{1}{LC}}$  е квазирезонансна честота, а  $\delta = \frac{R}{2L}$  - затихване на последователната RLC верига.

Изрза за напрежението на кондензатора  $u_c(t)$  е следния :

$$(3) \quad u_c(t) = U_d - (U_d + U_0) e^{-\delta t} \left( \frac{\delta}{\Omega} \text{sh}\Omega t + \text{ch}\Omega t \right) - \frac{I_0}{\Omega C} e^{-\delta t} \text{sh}\Omega t.$$

По аналогия с анализа на последователни RLC инвертори, работещи в резонансен (колебателен) режим, при анализа на последователни RLC инвертори, работещи в апериодичен режим се въвеждат коефициентите:

$$- k_A = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\delta\pi}{\Omega}}} - \text{коефициент на апериодичност};$$

$$- v_A = \frac{\omega}{\Omega} - \text{квазичестотен коефициент}.$$

С  $\omega$  е означена честотата на управление.

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 -  $I_0 = \frac{2K_{an}U_d}{\Omega L} a_{an}$  и  $U_0 = (2K_{an}-1)U_d$ , където

$$K_{an} = \frac{1}{1 - h_{an} e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}}} = \frac{1}{1 - h_{an} \left(\frac{k_A - 1}{k_A}\right)^{\frac{1}{v_A}}} \quad \text{е величина характеризираща}$$

последователната RLC верига, наречена коефициент на апериодичност при апериодичните инвертори с обратни диоди, а с  $h_{an}$  и  $a_{an}$  са означени :

$$h_{an} = \frac{-\frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{k_A}{k_A - 1}\right) \text{sh} \frac{\pi}{v_A} - \text{ch} \frac{\pi}{v_A} - \left(\frac{k_A - 1}{k_A}\right)^{\frac{1}{v_A}}}{1 + \left(\frac{k_A - 1}{k_A}\right)^{\frac{1}{v_A}} \left( \text{ch} \frac{\pi}{v_A} - \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{k_A}{k_A - 1}\right) \text{sh} \frac{\pi}{v_A} \right)},$$

$$a_{an} = \frac{\text{sh} \frac{\pi}{v_A}}{\left(\frac{k_A}{k_A - 1}\right)^{\frac{1}{v_A}} + \text{ch} \frac{\pi}{v_A} - \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{k_A}{k_A - 1}\right) \text{sh} \frac{\pi}{v_A}}.$$

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

$$(4) \quad i(t) = \frac{2K_{an} U_d}{\Omega L} \sqrt{\left(1 + a_{an} \frac{\delta}{\Omega}\right)^2 - a_{an}^2} e^{-\delta t} \operatorname{sh}(\Omega t - \psi'_{\Lambda}),$$

$$(5) \quad u_C(t) = U_d - 2K_{an} U_d \sqrt{\left(\frac{\delta}{\Omega} - a_{an} + a_{an} \left(\frac{\delta}{\Omega}\right)^2\right)^2 - 1} e^{-\delta t} \operatorname{sh}(\Omega t + \phi'_{\Lambda}), \text{ където}$$

$$\psi'_{\Lambda} = \operatorname{arth} \frac{a_{an}}{1 + a_{an} \frac{\delta}{\Omega}}, \text{ а } \phi'_{\Lambda} = \operatorname{arth} \frac{1}{\frac{\delta}{\Omega} - a_{an} + a_{an} \left(\frac{\delta}{\Omega}\right)^2}.$$

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

$$(6) \quad i(\theta) = \frac{2K_{an} U_d}{\Omega L} \sqrt{\left(1 + a_{an} \frac{\delta}{\Omega}\right)^2 - a_{an}^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta} \operatorname{sh} \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\theta - \psi_{\Lambda}) \text{ и}$$

$$(7) \quad u_C(\theta) = U_d - 2K_{an} U_d \sqrt{\left(\frac{\delta}{\Omega} - a_{an} + a_{an} \left(\frac{\delta}{\Omega}\right)^2\right)^2 - 1} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta} \operatorname{sh} \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\theta + \phi_{\Lambda}),$$

$$\text{където } \theta = \omega t, \lambda_{\Lambda} = \frac{\pi \omega}{\Omega}, \psi_{\Lambda} = \frac{\lambda_{\Lambda}}{\pi} \psi'_{\Lambda} \text{ и } \phi_{\Lambda} = \frac{\lambda_{\Lambda}}{\pi} \phi'_{\Lambda}.$$

От израз (6) се установява, че при ъгъла  $\theta = \psi_{\Lambda}$ , товарния ток се нулира.

Максималната стойност на товарния ток се получава при ъгъла

$$\theta_m = \frac{\lambda_{\Lambda}}{\pi} \operatorname{arth} \frac{\frac{\pi}{\delta}}{\frac{\delta}{\omega}} + \psi_{\Lambda} \text{ и е:}$$

$$(8) \quad I_{\max} = i(\theta_m) = \frac{2K_{an} U_d}{\Omega L} \sqrt{\left(1 + a_{an} \frac{\delta}{\Omega}\right)^2 - a_{an}^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta_m} \operatorname{sh} \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\theta_m - \psi_{\Lambda}).$$

Средната стойност на тока през ключовете се определя с интеграла:

$$I_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi_{\Lambda}}^{\pi} i(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi_{\Lambda}}^{\pi} \frac{2K_{an} U_d}{\Omega L} \sqrt{\left(1 + a_{an} \frac{\delta}{\Omega}\right)^2 - a_{an}^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta} \operatorname{sh} \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\theta - \psi_{\Lambda}) d\theta, \text{ и след}$$

неговото решаване е :

$$(9) \quad I_{av} = \frac{2K_{an} U_d D_{\Lambda}}{2\pi \Omega L F_{\Lambda}} \left( e^{-\frac{\delta}{\omega} \pi} \operatorname{ch} \left( \alpha + \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\pi - \psi_{\Lambda}) \right) - e^{-\frac{\delta}{\omega} \psi_{\Lambda}} \operatorname{ch} \alpha \right),$$

$$\text{където } D_{\Lambda} = \sqrt{\left(1 + a_{\text{ан}} \frac{\delta}{\Omega}\right)^2 - a_{\text{ан}}^2}, F_{\Lambda} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} \text{ и } \alpha = \text{arth} \frac{\omega}{\frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}}}.$$

Средният ток консумиран от захранващия източник се намира с израза:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i(\theta) d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2K_{\text{ан}} U_d}{\Omega L} \sqrt{\left(1 + a_{\text{ан}} \frac{\delta}{\Omega}\right)^2 - a_{\text{ан}}^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta} \text{sh} \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\theta - \psi_{\Lambda}) d\theta,$$

$$(10) \quad I_d = \frac{2K_{\text{ан}} U_d D_{\Lambda}}{\pi \Omega L F_{\Lambda}} \left( e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}} \text{ch} \left( \alpha + \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\pi - \psi_{\Lambda}) \right) - \text{ch} \left( \alpha - \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} \psi_{\Lambda} \right) \right).$$

Средният ток през диодите се определя от израза:

$$(11) \quad I_{\text{див}} = I_{\text{ав}} - \frac{I_d}{2}.$$

Максималната стойност на напрежението върху кондензатора, се получава в момента  $\psi_{\Lambda}$  и е:

$$(12) \quad U_{C_{\text{max}}} = U_d - 2K_{\text{ан}} U_d \sqrt{\left(\frac{\delta}{\Omega} - a_{\text{ан}} + a_{\text{ан}}^* \left(\frac{\delta}{\Omega}\right)^2\right)^2 - 1} e^{-\frac{\delta \psi_{\Lambda}}{\omega}} \text{sh} \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\psi_{\Lambda} + \varphi_{\Lambda}).$$

Ефективната стойност на товарния ток е:

$$(13) \quad I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\theta) d\theta} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left( \frac{2K_{\text{ан}} U_d}{\Omega L} \sqrt{\left(1 + a_{\text{ан}} \frac{\delta}{\Omega}\right)^2 - a_{\text{ан}}^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \theta} \text{sh} \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (\theta - \psi_{\Lambda}) \right)^2 d\theta} =$$

$$= \frac{K_{\text{ан}} U_d D_{\Lambda}}{\Omega L} E_{\Lambda}, \text{ където}$$

$$E_{\Lambda} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{F_{\Lambda}} \left( e^{-4\pi \frac{\delta}{\omega}} \text{ch} \left( \alpha + \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} (4\pi - 2\psi_{\Lambda}) \right) - \text{ch} \left( \alpha - \frac{\pi}{\lambda_{\Lambda}} 2\psi_{\Lambda} \right) \right) - \frac{\omega}{\delta} \left( e^{-4\pi \frac{\delta}{\omega}} - 1 \right) \right)}.$$

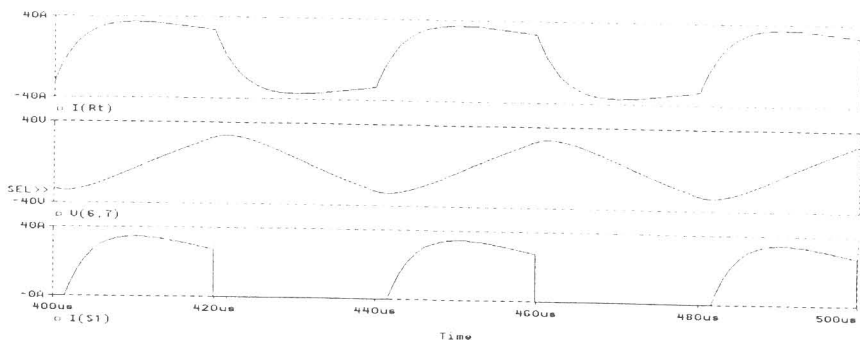
За ефективната стойност на товарното напрежение се получава:

$$(14) \quad U = \frac{2K_{\text{ан}} \delta U_d D_{\Lambda}}{\Omega} E_{\Lambda}.$$

Получените изрази могат да бъдат в основата на инженерна методика за проектиране на последователни RLC инвертори с обратни диоди, работещи в апериодичен режим.

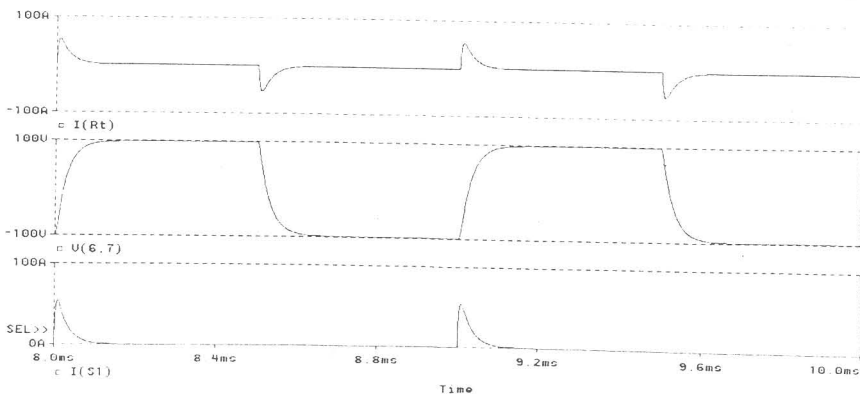
Предложения анализ е приложим и за случаите на последователни RLC инвертори без обратни диоди, когато е избран подходящ квазичестотен коефициент  $v_{\Lambda}$ , който гарантира работоспособността

на схемата в този случай. Тъй като автономния инвертор на напрежение е частен случай на последователния RLC инвертор с обратни диоди, работещ в аperiодичен режим при стойност на кондензатора  $C=\infty$ , то за неговия анализ могат да бъдат използвани намерените по-горе съотношения, като се отчете че в този случай  $\delta=\Omega$ .



фиг.3

На фиг.3 и фиг.4 са представени резултати от компютърни симулации (последователно отгоре надолу са показани товарния ток, напрежението на кондензатора и тока през ключа) за два частни случая



фиг.4

на квазичестотни коефициенти  $v_A=1.5$  и  $v_A=0.056$ , които показват че във втория случай, когато  $v_A < 1$  схемата е работоспособна и при

използване на прибори с непълно управление, а използването на обратни диоди не е нужно.

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. 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. Попов Е. И., "Изследване на транзисторни RLC инвертори при работа в аperiодичен режим", Сборник доклади на Петата национална научно-приложна конференция с международно участие "Електронна техника - ЕТ'96" 27-29 септември 1996г., гр. Созопол.