

МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА МОСТОВ РЕЗОНАНСЕН ИНВЕРТОР С ОБРАТНИ ДИОДИ, РАБОТЕЩ В РЕЖИМ НА ПОДРЕЗОНАНСНА ЧЕСТОТА

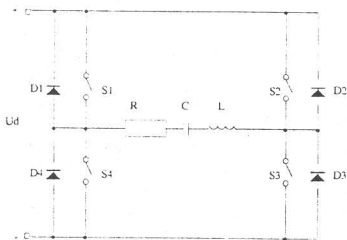
Доц.г-р инж. Никола ГРАДИНАРОВ, ст.ас.г-р инж. Николай ХИНОВ,
инж. Димитър АРНАУДОВ

Технически университет - София, Катедра "Силова електроника"
E-mail:hinov@yahoo.com

The paper presents a method for developing RIRD (resonant inverter with reverse diode), working on a under resonant frequency, which is founded on an authors previous research.

The designing of the inverter can be more accurate and easier when using the exact formulas for the output current (1) and the voltage across the comutating capacitor (2). These equations are normalized with reference to the switching frequency ω and their initial phase is included. It allows simplified visualization of the power-circuit processes but nevertheless is not less accurate than the usual method.

В работата въз основа на направен от авторите анализ на мостов резонансен инвертор с обратни диоди (РИОД), работещ в режим на подрезонансна честота е предложена методика за проектирането на този вид инвертори.



фиг.1

Схемата на мостов РИОД е показана на фиг.1

Използването на точен израз в кондензиран вид за инвертирания ток (1) и напрежението на комутация кондензатор (2), изведени в нормиран вид по отношение на управляващата честота ω и описани с началната си фаза [1], са в основата на предложената методика за

проектиране на РИОД:

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

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

$R=R_{(1)}$ е еквивалентното товарно съпротивление, L и C са еквивалентните комутиращи индуктивност и капацитет, U_d е

напрежението на постояннооточковия захранващ източник, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$, резонансната честота на последователния трептящ кръг, а $\delta = \frac{R}{2L}$ неговото затихване, $\nu = \frac{\omega}{\omega_0}$ е честотен коефициент, с h и a са означени:

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

Коефициента на разколебаване k е от вида $k = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\delta \pi}{\omega_0}}}$, а $\psi' = \arctg \frac{a}{1 - a \frac{\delta}{\omega_0}}$,

$$\varphi' = \arctg \frac{1}{\frac{\delta}{\omega_0} - a - a \left(\frac{\delta}{\omega_0} \right)^2}, \psi = \frac{\lambda}{\pi} \psi', \varphi = \frac{\lambda}{\pi} \varphi' \text{ и } k_{\text{од}} = \frac{1}{1 - h e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}}} = \frac{1}{1 - h \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{\nu}}}.$$

Средната стойност на тока през приборите се определя с интеграла [1]:

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

неговото решаване е:

$$(3) \quad I_{\text{ав}} = \frac{2k_{\text{од}} U_d}{\omega_0 L} \frac{\sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0} \right)^2 + a^2}}{2\pi F} \left(e^{-\frac{\delta}{\omega} (\lambda - \psi)} \sin \alpha + \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \psi + \alpha \right) \right),$$

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

Средният ток консумиран от захранващия източник I_d се намира аналогично:

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

$$(4) \quad I_d = - \frac{2k_{\text{од}} U_d}{\omega_0 L} \frac{\sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0} \right)^2 + a^2}}{\pi F} \left(e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}} \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} (\pi + \psi) + \alpha \right) - \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \psi + \alpha \right) \right).$$

Средният ток през диодите $I_{\text{дав}}$ се определя от израза:

$$(5) \quad I_{\text{дав}} = I_{\text{ав}} - \frac{I_d}{2}.$$

Максималната стойност на напрежението върху еквивалентния комутиращ кондензатор $U_{C_{\max}}$, се получава като израз за $u_C(\vartheta)$ - (2) се изчисли за $\vartheta = \frac{\lambda}{\pi} \alpha - \varphi$ и е:

$$(6) \quad u_{C_{\max}} = U_d - 2k_{od}U_d \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} - a - a\left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} e^{-\delta \frac{\lambda}{\pi} \frac{\alpha - \varphi}{\omega}} \sin \alpha.$$

Максималната стойност на инвертирания ток - I_{\max} се получава в момента $\vartheta = \frac{\lambda}{\pi} \alpha - \psi$ и е съответно:

$$(7) \quad I_{\max} = \frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\delta \frac{\lambda}{\pi} \frac{\alpha - \psi}{\omega}} \sin \alpha$$

Схемното време за възстановяване на приборите в установен режим - t_{qc} е:

$$(8) \quad t_{qc} = \frac{\pi + \psi - \lambda}{\omega}.$$

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.

За ефективната стойност на товарния ток, при активен характер на товара се получава:

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

$$= \frac{2k_{od}U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} \frac{J}{\sqrt{2\pi}},$$

$$\text{където } J = \sqrt{\frac{\omega}{2\delta} \left(1 - e^{-2\delta \frac{\pi}{\omega}}\right) + E \left(e^{-2\delta \frac{\pi}{\omega}} \left(\cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{\lambda}(\pi + \psi)\right) - \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{\lambda}\psi\right)\right)\right)},$$

$$E = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{2\delta}{\omega}\right)^2}.$$

Ефективната стойност на товарното напрежение е:

$$(9) \quad U = RI = \frac{4k_{od}U_d \delta}{\omega_0} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} \frac{J}{\sqrt{2\pi}}.$$

За да се определи ефективната стойност на товарното напрежение при комплексен характер на товара и 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:

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

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

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

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

където

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

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

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

$$(10) \quad I_{(1)\text{max}} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2},$$

Максималната стойност на товарното напрежение е:

$$(11) \quad U_{T\text{max}} = I_{(1)\text{max}} Z_{(1)} = \frac{(\sqrt{a_1^2 + b_1^2}) R_{(1)}}{\cos \beta}, \text{ където } \beta = \arctg \frac{X_{(1)}}{R_{(1)}} \text{ е ъгъла на}$$

гефазиране между инвертирания ток и инвертираното напрежение.

За да работи РИОД в режим на подрезонансна честота, то променливотоковата верига трябва да е в капацитивна разстройка, т.е. $X_{\text{екв}} = X_{(1)}$ има капацитивен характер. Тогава:

$$\omega_0^2 + \delta^2 = \frac{1}{CL} = \frac{\omega}{\omega CL} = \frac{\omega X_{\text{екв}}}{L} = \frac{\omega \text{tg} \beta R_{\text{екв}}}{L} =$$

$$= \frac{2\omega \text{tg} \beta R_{\text{екв}}}{2L} = 2\omega \text{tg} \beta \delta = 2\omega \text{tg} \beta \delta \frac{\omega_0}{\omega_0} = 2\omega_0 \text{tg} \beta \delta \nu$$

В окончателен вид се получава, че:

$$(12) \operatorname{tg}\beta = \frac{\omega_0^2 + \delta^2}{2\omega_0\delta v} = \frac{\omega_0 + \delta}{2v} = \frac{\ln k + \frac{\pi}{k-1}}{2v}$$

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

$$(13) U_T = \frac{U_{T\max}}{\sqrt{2}}$$

От принципа на действие на РИОД се вижда, че приборите се изключват с малко обратно напрежение равно на пада върху обратния диод, а максималната стойност на правото напрежение върху приборите е:

$$(14) U_{DRM} = U_d$$

Обикновено се задават следните изходни данни за проектиране:

- изходната активна товарна мощност P_T ;
- $\cos\varphi_T$ на товара;
- ефективната стойност на товарното напрежение U_T ;
- изходна честота $f(\omega)$.

Също така е известно в зависимост от вида на хранващата променливотокова мрежа и схемата на токоизправителя големината на хранващото постоянноково напрежение.

Избират се коефициента на разколебаване k , честотния коефициент v и начина на съгласуване на инвертора и товара.

I. Методика за проектиране на последователен РИОД

При избрани коефициенти k и v с помощта на израз (9) се определя ефективната стойност на товарното напрежение U_T . Ако така получената стойност не съвпада със зададената се налага използването на инверторен трансформатор.

- определя се големината на товарното съпротивление - R :

$$R = \frac{U_T^2}{P_T};$$

- намиране на собствената честота на последователния резонансен кръг - ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{\omega}{v};$$

- определяне на затихването на последователния резонансен кръг - δ :

$$\delta = \frac{\omega_0}{\pi} \ln \frac{k}{k-1};$$

- определяне на стойността на комутиращата индуктивност - L :

$$L = \frac{R}{2\delta};$$

- изчисляване на стойността на комутационния капацитет - C:

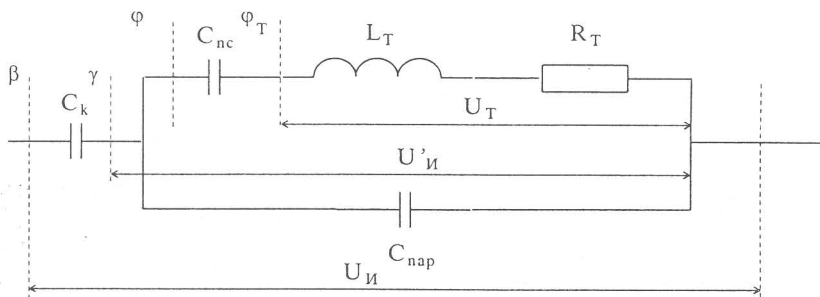
$$C = \frac{1}{L(\omega_0^2 + \delta^2)};$$

Определянето на големината на средната стойност на тока през приборите - I_{av} , на консумирания от захранващия източник ток - I_d , на средния ток през диодите - I_{dav} , на максималната стойност на напрежението върху комутационния кондензатор - $U_{стmax}$, на максималната стойност на инвертирания ток - $I_{тmax}$, и на времето за възстановяване на приборите - t_{qc} , става съответно с изрази (3), (4), (5), (6), (7) и (8).

Така направените изчисления позволяват да се извърши проектирането на последователния РИОД.

II. Методика за проектиране на РИОД с паралелна компенсация

На фиг.2 е показан най-общия вид на променливотоковата верига



фиг.2

при използване на паралелна компенсация на товара.

II.1 Методика за проектиране на паралелен РИОД

При използването на паралелна компенсация на товара, както е в този случай, паралелния товарен кръг се заменя със своите активно и реактивно съпротивления по първи хармоник - $R_{(1)}$ и $X_{(1)}$ [1].

- определят се стойностите на коефициента на разколебаване k и честотния коефициент ν , с които се постига зададеното инвертирано (товарно) напрежение. Това става като се използва израз (13). Ако така получената стойност не съвпада със зададената се налага използването на инверторен трансформатор.

- намиране на фазовия ъгъл на променливотоковата верига - β , с помощта на израз (12):

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\ln \frac{k}{k-1} + \frac{\pi}{\ln \frac{k}{k-1}}}{2\nu};$$

- определяне на собствената резонансна честота на последователния резонансен кръг - ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\nu};$$

- изчисляване на активното товарно съпротивление на паралелната заместваща схема на товара - R_c :

$$R_c = \frac{U_T^2}{P_T};$$

- определяне на параметрите от последователната заместваща схема на товара:

$$R_T = \frac{R_c}{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_T}, \quad L_T = \frac{R_T \operatorname{tg}\varphi_T}{\omega};$$

- намиране на първите хармонични на активната - $R_{(1)}$ и реактивна - $X_{(1)}$ съставки на последователната заместваща схема на променливотоковата верига на инвертора (в случая паралелния товарен кръг):

$$R_{(1)} = R_c \cos^2\beta, \quad X_{(1)} = R_c \cos\beta \sin\beta;$$

- определяне на затихването на последователния резонансен кръг - δ :

$$\delta = \frac{\omega_0}{\pi} \ln \frac{k}{k-1};$$

- определяне на стойността на комутиращата индуктивност - L :

$$L = \frac{R_{(1)}}{2\delta};$$

- определяне на стойността на товарния (паралелния) капацитет - $C_{\text{пар}}$:

$$C_{\text{пар}} = \frac{\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi_T}{\omega R_c}.$$

Определянето на големината на средната стойност на тока през приборите - $I_{\text{ав}}$, на консумирания от захранващия източник ток - $I_{\text{д}}$, на средния ток през диодите - $I_{\text{дав}}$, на максималната стойност на напрежението върху комутирация кондензатор - $U_{\text{стmax}}$, на максималната стойност на инвертирания ток - I_{max} , I на времето за възстановяване на приборите - t_{qc} , става съответно с изрази (3), (4), (5), (6), (7) и (8).

- максималното напрежение на товарния кондензатор - $U_{C_{\text{пар}} \text{ макс}}$ е:

$$U_{C_{n, \text{max}}} = U_{T \text{max}};$$

Направените изчисления позволяват да се изберат силовите прибори. Ако е необходимо се прави паралелно или последователно включване на прибори.

II.2 Методика за проектиране на последователно-паралелен РИОД

Тъй като има голяма степен съвпадение с проектирането на паралелния РИОД, в настоящата точка ще бъдат подчертани само различията с предния случай. В този случай трябва да се избере стойността на инвертираното напрежение, защото тя обикновено не фигурира в заданието. Най-често при използване на последователно-паралелната резонансна изходна верига, товарното напрежение е с по-ниска стойност от инвертираното.

- определяне на разстройката на паралелния товарен кръг - γ :

$$\cos \gamma = \frac{U_{II}}{U_T} \cos \beta.$$

- намиране на стойността на товарният капацитет - $C_{\text{пар}}$:

$$C_{\text{пар}} = \frac{\text{tg} \gamma + \text{tg} \varphi_T}{\omega R_c}.$$

- определяне на стойността на еквивалентният комутиращ кондензатор - C_c :

$$C_c = \frac{1}{L(\omega_0^2 + \delta^2)}.$$

- изчисляване на капацитета на комутиращия кондензатор - C_k :

$$C_k = \frac{C_c C_{(1)}}{C_{(1)} - C_c}, \text{ където } C_{(1)} = \frac{1}{\omega X_{(1)}}.$$

- определяне на максималното напрежение на комутиращия кондензатор - $U_{C_{k \text{max}}}$:

$$U_{C_{k \text{max}}} = X_{C_{k \text{max}}} I_{(1) \text{max}} = \frac{1}{\omega C_k} \frac{U_{T \text{max}}}{R_{(1)}} \cos \gamma.$$

II.3 Методика за проектиране на паралелно-последователен РИОД

В предложената методика ще бъдат подчертани само различията в сравнение с базовата схема на паралелен РИОД. Избора на ефективната стойност на инвертираното напрежение, се определя от същите съображения както и в предните точки.

- определяне на разстройката на последователния товарен кръг - φ :

$$\cos \varphi = \frac{U_T}{U_{II}} \cos \varphi_T;$$

Последователния резонансен кръг съставен от R_T , L_T и $C_{ПС}$ се заменя с импеданс от последователно свързани активна - R_T и реактивна - $X_{ПС}$ съставки. Този импеданс може да се преобразува в еквивалентен състоящ се от паралелно свързани активна - $1/R_{екв}$ и реактивна - $1/X_c$ съставка.

- изчисляване на активното товарно съпротивление на паралелната заместваща схема на еквивалентния товар - $R_{екв}$:

$$R_{екв} = \frac{U_{И}^2}{P_T};$$

- намиране на първите хармонични на активната - $R_{(1)}$ и реактивна - $X_{(1)}$ съставки на последователната заместваща схема на променливотоковата верига на инвертора:

$$R_{(1)} = R_{екв} \cos^2 \beta, \quad X_{(1)} = R_{екв} \cos \beta \sin \beta.$$

- определяне на стойността на паралелния капацитет - $C_{пар}$:

$$C_{пар} = \frac{\text{tg} \beta + \text{tg} \varphi}{\omega R_{екв}}.$$

- изчисляване на стойността на последователния капацитет - $C_{нс}$:

$$C_{нс} = \frac{1}{\omega R_T (\text{tg} \varphi_T - \text{tg} \varphi)}.$$

- определяне на максималното напрежение на последователния кондензатор - $U_{C_{нс} макс}$:

$$U_{C_{нс} макс} = X_{C_{нс} макс} I_{Т макс} = \frac{1}{\omega C_{нс}} \frac{U_{И макс}}{R_T} \cos \varphi = U_{И макс} (\text{tg} \varphi_T - \text{tg} \varphi) \cos \varphi.$$

- намиране на максималното напрежение на паралелния кондензатор - $U_{C_{пар} макс}$:

$$U_{C_{пар} макс} = U_{И макс}.$$

II.4 Методика за проектиране на последователно-паралелно-паралелно-последователен РИОД

Схемата на последователно-паралелната резонансна изходна верига е показана на фиг.2. Съобразявайки се с възможностите на последователно-паралелната верига да намали, респ. паралелно-последователната да увеличи изходното си напрежение се избира напрежението $U_{И}$. Също така трябва да се избере стойността на инвертираното напрежение. В изложената методика ще бъдат подчертани само различията със случая на проектиране на паралелен РИОД.

- намиране на разстройката на последователния товарен кръг - φ :

$$\cos \varphi = \frac{U_T}{U_{И}} \cos \varphi_T.$$

- определяне на разстройката на паралелния товарен кръг - γ :

$$\cos \gamma = \frac{U_{II}}{U_{II}'} \cos \beta.$$

Подобно на показаното при проектирането на паралелно-последователния РИОД последователния товарен резонансен кръг съставен от R_T , L_T и $C_{ПС}$ се заменя с импеданс от последователно свързани активна - R_T и реактивна - $X_{ПС}$ съставки. Този импеданс може да се преобразува в еквивалентен състоящ се от паралелно свързани активна - $1/R_{екв}$ и реактивна - $1/X_{епар}$ съставки.

- изчислява се активното товарно съпротивление на паралелната заместваща схема на еквивалентния товар - $R_{екв}$:

$$R_{екв} = \frac{(U_{II}')^2}{P_T}.$$

- определяне на първите хармонични на активната - $R_{(1)}$ и реактивна - $X_{(1)}$ съставки на последователната заместваща схема на паралелно-последователния товарен кръг:

$$R_{(1)} = R_{екв} \cos^2 \gamma, \quad X_{(1)} = R_{екв} \cos \gamma \sin \gamma.$$

- намиране на стойността на паралелния капацитет - $C_{пар}$:

$$C_{пар} = \frac{tg \gamma + tg \varphi}{\omega R_{екв}}.$$

- определяне на стойността на последователния капацитет - $C_{пс}$:

$$C_{пс} = \frac{1}{\omega R_T (tg \varphi_T - tg \varphi)}.$$

- изчисляване на стойността на еквивалентният комутиращ капацитет - C_e :

$$C_e = \frac{1}{L(\omega_0^2 + \delta^2)}.$$

- намиране на капацитета на комутиращия кондензатор - C_k :

$$C_k = \frac{C_e C_{(1)}}{C_{(1)} - C_e}, \quad \text{където } C_{(1)} = \frac{1}{\omega X_{(1)}}.$$

- определяне на максималното напрежение на последователния кондензатор - $U_{C_{пс} макс}$:

$$U_{C_{пс} макс} = X_{C_{пс} макс} I_{T макс} = \frac{1}{\omega C_{пс}} \frac{U_{II макс}}{R_T} \cos \varphi = U_{II макс} (tg \varphi_T - tg \varphi) \cos \varphi.$$

- изчисляване на максималното напрежение на паралелния кондензатор - $U_{C_{пар} макс}$:

$$U_{C_{пар} макс} = U_{II макс}.$$

- определяне на максималното напрежение на комутацията кондензатор - $U_{C_{k,max}}$:

$$U_{C_{k,max}} = X_{C_k} I_{(1)max} = \frac{1}{\omega C_k} \frac{U_{I,max}}{R_{(1)}} \cos \gamma .$$

За проверка на достоверността на предложените методики за проектиране на РИОД е извършена компютърна симулация. Изходни данни за проектирането на последователно-паралелен РИОД са:

- изходната активна товарна мощност $P_T = 50kW$;
- $\cos \varphi_T = 0.1$;
- ефективната стойност на товарното напрежение $U_T = 600V$;
- изходна честота $f = 4000Hz$.

В Таблица 1 са сравнени резултатите изчислени с помощта на методиката за проектиране на последователно-паралелен РИОД и тези получени от симулатора PSPICE.

Табл.1

резултати	R_T, Ω	$L_T, \mu H$	$C_{пар}, \mu F$	$C_k, \mu F$	$L_k, \mu H$	I_d, A
изчислени	0.072	28.5	61.029	34.1	125.765	102.39
симулирани	0.072	28.5	61.029	34.1	125.765	100.817
резултати	I_{max}, A	U_T, V	U_{Dm}, V	U_{II}, V	U_{Ckmax}, V	$t_{q}, \mu s$
изчислени	192.9133	650	500	713	201.783	16.5
симулирани	192.488	597.674	500	710.125	192.666	17

От данните показани в Табл.1 се вижда, че за всички величини определени при проектирането грешката е по-малка от 5%.

Използването на точен израз в кондензиран вид за инвертирания ток (1) и напрежението на комутацията кондензатор (2), изведени в нормиран вид по отношение на управляващата честота ω и описани с началната си фаза [1], позволява по-нагледна илюстрация на процесите в силовата схема, по-големи удобства при проектирането, като това не е за сметка на точността.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Градинаров Н. П., Н. Хинов. Анализ на автономни резонансни инвертори с обратни диоди и комплексен товар. *Сборник доклади на Шестата национална научно-приложна конференция с международно участие „Електронна техника - ЕТ'97“ 24-27 септември 1997г., гр. Созопол, 74-79.*

2. Беркович Е. И., Г. В. Ивенский, Ю. С. Йоффе, А. Т. Матчак, В. В. Моргун. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок. *Энергоатомиздат, Ленинград, 1983.*

3. Бобчева М., Е. Попов и др. Ръководство за проектиране на силови електронни устройства. *Техника, София, 1991.*

4. Тодоров Т. С., Н. Д. Магжаров, Д. Т. Алексиев, П. Т. Иванов. Автономни инвертори. *Габрово, 1996.*

5. Хинов Н. Л., 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.*

6. Хинов Н. Л., 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.*