

АНАЛИЗ НА АВТОНОМНИ РЕЗОНАНСНИ ИНВЕРТОРИ С ПРИНУДИТЕЛНА КОМУТАЦИЯ

инж. Николай ХИНОВ, Доц.г-р инж. Никола ГРАДИНАРОВ

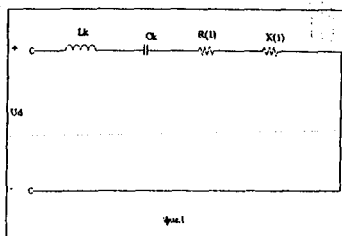
Технически университет - София, Катедра "Силова електроника"

The paper presents analysis of bridge resonance inverter operating in a regime of induced commutation, at complex load. The usage of general hesitation coefficient at a regime of induced commutation and the choice of relevant technological scheme of the load makes possible the derivation of good functional relations for all parameters necessary in the design of such inverters.

Автономните инвертори, използвани като захранващи източници за различни електротехнологии са доказали отдавна своите преимущества, пред другите възможни технически средства. Това налага изработването на цялостна теория за техничски анализ и проектиране. В литературата са правени опити за обобщено изследване на този клас инвертори [Л1,Л5], но използвания математически апарат е доста сложен, обемист и не дава нагледна представа за характера на електромагнитните процеси протичащи в силовата схема на инвертора.

В предложената работа се предлага единен подход за анализ на инверторите с електротехнологично предназначение (инвертори на ток и резонансни инвертори).

Известно е, че променливотоковата товарна верига на инвертора, която може да бъде от произволна сложност се представя, по първи хармоник на инвертирания ток с последователно съединение на активно и реактивно съпротивление. Отчитането само на товарното напрежение създавано от първия хармоник на инвертирания ток не нарушава точността на анализа, защото качествения фактор Q на компенсирания товар във вид на паралелен трептящ кръг най-често е между 3 и 10, при което останалите хармонични съставки на инвертирания ток създават върху товарния кръг не повече от 10% от цялото товарно напрежение [Л1].

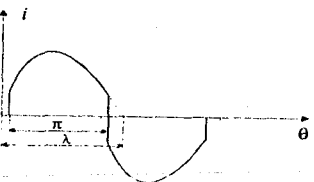
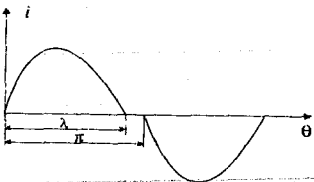
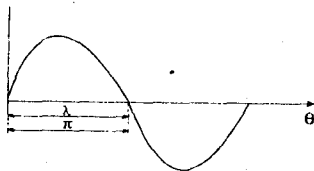


От казаното по горе следва, че за всички видове инвертори използвани за захранващи източници за различни видове електротехнологии е в сила най-общата еквивалентната схема показана на фиг.1. Използвани са следните означения: L_k - комутираща индуктивност, C_k - комутиращ капацитет, $R_{(1)}$ - активна съставка по първи хармоник на инвертирания ток на товарния

кръг, $X_{(1)}$ - реактивна съставка по първи хармоник на инвертирния ток на товарния кръг. Следва да се отбележи, че при резонанс на товарния кръг $X_{(1)}=0$, а в някои от схемните разновидности могат да липсват L_k или C_k и тяхната роля се играе от разпространения товарен кръг. Когато е налице пълната схемна конфигурация показана на фиг.1, то при различните видове разстройки на товарния кръг действат еквивалентно активно съпротивление $R=R_{(1)}$ и еквивалентна комутираща индуктивност $L=L_k + L_{(1)}$ или еквивалентен комутиращ капацитет $C=\frac{C_k C_{(1)}}{C_k + C_{(1)}}$.

При изпълнение на условието за резонансни процеси в показаната на фиг.1 RLC верига ($R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$), на фиг.2 са показани трите възможни режима на работа на резонансните инвертори:

- граничен режим;
- режим на прекъснат ток (РПТ) известен още като режим с естествена комутация на приборите;
- режим на непрекъснат ток (РНТ) известен още като режим с принудителна комутация на приборите.



фиг.2

Използвани са следните означения: λ - ъгъл на провеждане на приборите нормиран спрямо управляващата честота ω , $\vartheta = \omega t$ - текущ ъгъл.

В зависимост от съотношението на управляващата честота ω и резонансната честота на последователния кръг ω_0 е възможна работата на АРИ в някой от тези режими.

Известни са анализите на резонансни инвертори без обратни диоди при различни режими: с естествена комутация до граничен режим [Л2] и при режим с изкуствена комутация [Л3], а също така и на резонансни инвертори с обратни диоди [Л4].

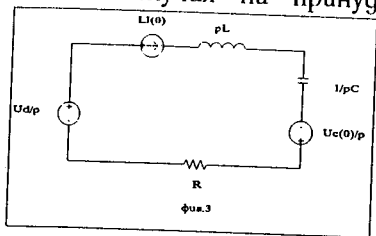
При реалните промени на товара в автономните резонансни инвертори (АРИ) и трите работни режима са възможни. Затова представлява интерес анализирането на всички възможни работни режими на тези инвертори.

За да бъде направен общ анализ на резонансните инвертори се изхожда от обобщената еквивалентна схема в операторен вид на резонансните инвертори, която е показана на фиг.3.

Анализът се прави при следните допускания:

- захранващият източник е с нулево вътрешно съпротивление;
- приборите са идеални;
- качествения фактор на товарния кръг е между 3 и 10.

В случая на принудителна комутация на приборите е сила еквивалентната схема показана на фиг.3, т.е. инвертирания ток е с ненулеви начални условия



Изразите за инвертирания ток и напрежението на комутирация кондензатор при режим на непрекъснат ток (отговарящ на режим с принудителна комутация $\omega_0 < \omega$) се определят като се

изходи от условията за периодичност т.е.:

$$u_C(0) = -u_C\left(\frac{\pi}{\omega}\right) \text{ и } i(0) = i\left(\frac{\pi}{\omega}\right).$$

Представени в кондензиран вид като функция на управляващата честота ω , по аналогия с изразите при автономният резонансен инвертор с обратни диоди [Л4] са:

$$(1) \quad i(\vartheta) = \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) \text{ и}$$

$$(2) \quad u_C(\vartheta) = U_d - 2k_1 U_d \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0} - a - a \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)^2} e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega}} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \varphi), \text{ където}$$

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{CL}} - \delta^2$ - резонансна честота на последователният кръг съставен

от C, L и R, $\delta = \frac{R(\omega)}{2L}$ - затихване на последователния резонансен кръг,

$k = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\delta \pi}{\omega_0}}}$ - коефициент на разколебаване, U_d - захранващото напрежение,

$k_1 = \frac{1}{1 - h_1 e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}}} = \frac{1}{1 - h_1 \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{\nu}}}$ е величина характеризираща резонансния

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

естествена комутация наречена коефициент на разколебаване на резонансни инвертори работещи в режим на принудителна комутация, $v = \frac{\omega}{\omega_0}$ е коефициент на прекъснатост, а с h_1 и a са означени :

$$h_1 = \frac{\left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{v}} - \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{k}{k-1}\right) \sin \frac{\pi}{v} - \cos \frac{\pi}{v}}{\left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{v}} \left(\frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{k}{k-1}\right) \sin \frac{\pi}{v} - \cos \frac{\pi}{v}\right) + 1} \quad \text{и} \quad a = \frac{\sin \frac{\pi}{v}}{\frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{k}{k-1}\right) \sin \frac{\pi}{v} - \cos \frac{\pi}{v} + \left(\frac{k}{k-1}\right)^{\frac{1}{v}}}$$

Ъглите ψ и φ отразяват началните фази съответно на инвертирания ток и на напрежението на комутиращия кондензатор и са съответно:

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

Средната стойност на консумирания ток, като се има предвид фиг.2 се определя с интеграла:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i(\vartheta) d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) d\vartheta \quad \text{и} \quad \text{след}$$

неговото решаване е :

$$(3) \quad I_d = \frac{\frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2}}{\pi F} \left(e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}} \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} (\pi + \psi) + \alpha \right) - \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \psi + \alpha \right) \right),$$

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

Средната стойност на тока през приборите е $I_{av} = \frac{I_d}{2}$.

Максималната стойност на тока през приборите се определя от израза за тока (1), при $\vartheta = \frac{\lambda}{\pi} \alpha - \psi$:

$$(4) \quad I_{\max} = i \left(\frac{\lambda}{\pi} \alpha - \psi \right) = \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta}{\omega} \left(\frac{\lambda}{\pi} \alpha - \psi \right)} \sin \alpha$$

Максималната стойност на напрежението върху комутиращия кондензатор е:

$$(5) \quad U_{\text{стmax}} = (2k_1 - 1) U_d$$

Изразът за напрежението на комутиращата индуктивност е:

$$u_L = \omega L \frac{di(\vartheta)}{d\vartheta} = \omega L \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} F e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega_0}} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda}(\vartheta + \psi)\right).$$

Тук за разлика от АРИ работещи в режим с естествена комутация на приборите (заради общността на анализа са предполагае, че се работи не само с пълно, но и с непълноуправляеми прибори) се предпочитва комутиращата индуктивност да е изцяло в постояннотоковата верига, за да се осигури по този начин по-голямо време за възстановяване на приборите, поради същите причини се избира и кондензаторната разстройка на товарния кръг, за това по нататък разглеждаме тези случаи.

Напрежението на прибора, когато е запушен се описва с израза:

$$u_a = U_d - u_L = U_d - \omega L \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} F e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega_0}} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda}(\vartheta + \psi)\right).$$

Максималната стойност на обратното напрежение върху приборите е в момента $\vartheta = 0$ и е съответно:

$$(6) \quad U_{RRM} = U_d - \omega L \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} F \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda} \psi\right),$$

Максималната стойност на правото напрежение върху приборите се получава в момента $\vartheta = 2\frac{\lambda}{\pi}\alpha - \psi$ и е:

$$(7) \quad U_{DRM} = U_d + \omega L \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} F e^{-\frac{\delta}{\omega_0}\left(2\frac{\lambda}{\pi}\alpha - \psi\right)} \sin \alpha.$$

Стойността на правото напрежение върху прибора в края на интервала на непровеждане е близка до максималната и е:

$$U_{D(\vartheta=\pi)} = U_d + \omega L \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} F e^{-\frac{\delta \pi}{\omega_0}} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda}(\pi + \psi)\right).$$

Времето за възстановяване на приборите се определя като израз за u_a се приравни на нула и в резултат на това се получава следното уравнение:

$$(8) \quad e^{-\frac{\delta \vartheta}{\omega_0}} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda}(\vartheta + \psi)\right) = \frac{\omega_0}{2k_1 F}, \text{ което може да се реши с числени}$$

методи.

Интерес представлява намирането на фазовата разлика на първия хармоник на инвертирания ток $\varphi_{(1)}$, тъй като тя дава информация за това доколко инвертирания ток е идеално изгладен. За тази цел 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:

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) \cos \vartheta d\vartheta =$$

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

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2} e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\vartheta + \psi) \sin \vartheta d\vartheta =$$

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

където

$$A = \left(\left(\frac{\pi + \lambda}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right) \left(\left(\frac{\pi - \lambda}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right), B = \frac{2k_1 U_d}{\omega_0 L} \sqrt{\left(1 - a \frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 + a^2},$$

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

Тогава фазовата разлика $\varphi_{(1)}$ се получава от израза:

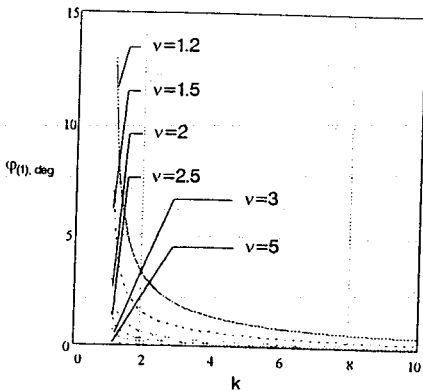
$$(9) \quad \varphi_{(1)} = \operatorname{arctg} \frac{a_{(1)}}{b_{(1)}}.$$

Очевидно коефициентите А, В, С, D, G и H са функции на коефициента на разколебаване k и коефициента на прекъснатост v , които се избират при проектирането.

Зависимостта на $\varphi_{(1)}$ от коефициентите k и v е показана на фиг.4.

От вида на тази зависимост се вижда, че при достатъчно големи стойности на коефициента на прекъснатост v , коефициента на разколебаване k влияе в много малка степен на $\varphi_{(1)}$.

Максималната стойност на първият хармоник на



фиг.4

товарният ток се получава с израза

$$(10) \quad I_{\text{товар}} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Максималната стойност на товарното напрежение е:

$$(11) U_{Tmax} = I_{(1)max} Z_{(1)} = \frac{(\sqrt{a_1^2 + b_1^2}) R_{(1)}}{\cos \gamma}, \text{ където } \gamma = \arctg \frac{X_{(1)}}{R_{(1)}} \text{ е ъгъл}$$

отразяващ разстройката на товарния кръг.

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

$$(12) U_T = \frac{U_{Tmax}}{\sqrt{2}}.$$

От тук по избрани k и v от съображенията за добре изгладен входен ток и загадена стойност на товарното напрежение, може да се определи необходимата стойност на захранващото напрежение и съгласуването на инвертора и товара.

Предложеният анализ може да се използва и за анализиране на инверторите на ток използвани за захранващи източници на електротехнологични устройства, както и на другите възможни схемни варианти (с разделен захранващ източник и с нулев извод на инверторния трансформатор), като се използват известните числови коефициенти [A5], свързващи токовете и напреженията в тях с тези в разгледаната мостова схема.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тодоров Т. С и др., "Автономни инвертори", ТУ-Габрово, Габрово, 1996г.
2. Хинов Н.Л., Н.Градинаров "Анализ и проектиране на последователно-паралелен резонансен инвертор". Сборник доклади на СИЕЛА'97 - конференция с международно участие, Пловдив, 1997г.
3. Каров Р.Д. "Анализ на резонансни инвертори с принудителна (взаимноимпулсна комутация)" Сборник доклади на конференция по случай деня на Рагюето, София, 1982г.
4. 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.
5. Беркович Е. И., Г. В. Ивенский и др., "Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок", Энергоатомиздат, Ленинград, 1983 г.
6. Brichant F., "L'ondistor", Dunod, Paris, 1974.