

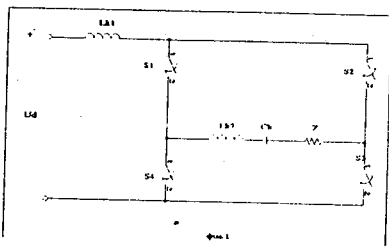
АНАЛИЗ НА АВТОНОМНИ РЕЗОНАНСНИ ИНВЕРТОРИ С КОМПЛЕКСЕН ТОВАР

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

Технически университет - София, Катедра "Силова електроника"

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

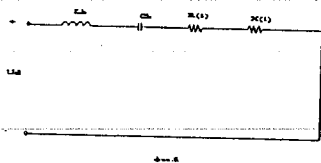
Автономните резонансни инвертори (АРИ) с комплексен товар, работещи в режим на естествена комутация на приборите до граничен режим, са анализирани в литературата [Л1]. Получават се сложни изрази, а редицата допускания с цел облекчаване на анализа водят до значителни неточности.



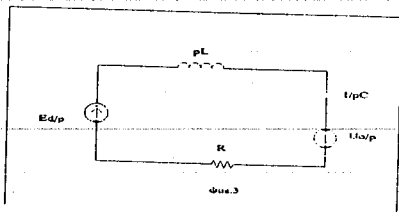
В настоящата работа са предлага анализ, при които се получават удобни и нагледни изрази, а отчитането на несинусоидалността на тока през товара го прави по-точен. Еквивалентната схема на анализираният мостов резонансен инвертор от фиг.1 е показана на фиг.2 и съвпада със описаната в [Л3] обобщена

еквивалентна схема. Използвани са същите означения.

За да бъде направен единен анализ на този клас инвертори се



изхожда от обобщената еквивалентна схема в операторен вид (показана на фиг.3), на еквивалентна



та схема на АРИ. Тя се различава от еквивалентната схема на АРИ работещ в режим на изкуствена комутация на приборите [Л3], по това че тока през комутиращата индуктивност е с нулеви начални условия.

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.

Определянето на $R_{(1)}$ и $X_{(1)}$ ще бъде показано за най-често използваната схема на резонансен инвертор работещ в режим на естествена комутация до граничен режим - последователно-паралелния резонансен инвертор. Паралелно компенсирания товар се представя като последователно свързване активна $R_{(1)}$ и реактивна $X_{(1)}$ съставящи по първа хармонична на инверторния ток, които се определят с изразите:

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

където R_e е еквивалентното активно товарно съпротивление от паралелната заместваща схема на товара, а γ е ъгъл отразяващ разстройката на товарния кръг. Знака на $X_{(1)}$ отразява наличието на капацитивна или индуктивна разстройка на товарния кръг. 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 $C = \frac{C_k C_{(1)}}{C_k + C_{(1)}}$.

Изразите за тока през еквивалентния товар и напрежението върху еквивалентния комутиращ кондензатор могат да бъдат написани като се използва анализа направен в [ЛЗ] и се отчете, че тока на еквивалентната индуктивност е с нулеви начални условия и са:

$$(1) \quad i(\vartheta) = \frac{2kU_d}{\omega_0 L_k} e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda} \vartheta = I_m e^{-\frac{\delta}{\omega_0} \vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda} \vartheta,$$

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

$$\text{където } I_m = \frac{2kU_d}{\omega_0 L_k}, \quad \varphi = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1}{\frac{\delta}{\omega_0}}.$$

Като се сравни изразите за инвертирания ток и напрежението на еквивалентния капацитет при режим на принудителна комутация [ЛЗ] изрази (1), (2) и при режим на естествена комутация до граничен режим изрази (1) и (2) се вижда, че ако в израза (1) [ЛЗ] се положи $\psi = 0$ (което отразява, че инвертирания ток е без начални условия), то и коефициента $a = 0$ и тогава ако предположим че работим в граничен режим, т.е. $v = 1$, то коефициента $k_1 = k$, (3) става еквивалентен на израза (1). Следователно анализа на АРИ работещи в режим на естествена комутация до граничен режим са частен случай на АРИ работещи в режим на принудителна комутация.

Средната стойност на консумирания ток се определя с израза:

$$(3) \quad I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\lambda i(\vartheta) d\vartheta = \frac{I_m}{\lambda} \frac{1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}}}{\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} = I_m H,$$

$$\text{където } H = \frac{1}{\lambda} \frac{1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}}}{\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2}.$$

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

$$(4) \quad I_{(1)\max} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = EI_m, \text{ където}$$

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\lambda I_m e^{-\frac{\delta}{\omega}\vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda} \vartheta \cos \vartheta d\vartheta = \frac{I_m}{\pi A} \left(e^{-\frac{\delta}{\omega}\lambda} (C \cos \lambda - D \sin \lambda) + C \right),$$

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\lambda I_m e^{-\frac{\delta}{\omega}\vartheta} \sin \frac{\pi}{\lambda} \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \frac{I_m}{\pi A} \left(e^{-\frac{\delta}{\omega}\lambda} (C \sin \lambda + D \cos \lambda) + D \right),$$

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

$$E = \frac{1}{\pi A} \sqrt{(C^2 + D^2) \left(e^{-\frac{2\delta\pi}{\omega}} + 2e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \cos \lambda + 1 \right)}.$$

Очевидно коефициентите A , C , D , E и H са функции на коефициента на разколебаване k и ъгъла на провеждане на приборите λ , които се избират при проектирането.

Максималната стойност на товарното напрежение е:

$$(5) \quad U_{T\max} = I_{(1)\max} Z_{(1)} = \frac{EI_m R_{(1)}}{\cos \gamma} = \frac{4kU_d E \delta}{\cos \gamma \omega}.$$

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

$$(6) \quad U_T = \frac{U_{T\max}}{\sqrt{2}} = \frac{4kU_d E \delta}{\sqrt{2} \cos \gamma \omega}.$$

Израза (6) дава възможност, при зададена ефективна стойност на товарното напрежение U_T и избрани стойности на коефициента на разколебаване k , коефициента на прекъснатост ν и разстройка на товарния кръг ψ , да се определи необходимата стойност на постояннотоковия захранващ източник U_d .

От товарната мощност може да се определи еквивалентното активно товарно съпротивление от паралелната заместваща схема на товара R_c :

$$(7) \quad R_c = \frac{U_T^2}{P_T}.$$

Напрежението на комутиращата индуктивност се определя с израза:

$$(8) \quad u_{Lk} = \omega L_k \frac{di(\vartheta)}{d\vartheta} = \omega L_k F I_m e^{-\frac{\delta}{\omega} \vartheta} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda} \vartheta\right),$$

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

Напрежението върху комутиращия кондензатор (ако съществува в схемната конфигурация извън товарния кръг) се намира по формулата:

$$(9) \quad u_{Ck}(\vartheta) = \frac{1}{\omega C_k} \int i(\vartheta) d\vartheta = -\frac{I_m}{\omega C_k F} e^{-\frac{\delta}{\omega} \vartheta} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{\lambda} \vartheta\right) + \text{Const.}$$

Интеграционната константа се намира от условието за периодичност на напрежението на комутиращия кондензатор т.е. $u_{Ck}(0) = -u_{Ck}(\lambda)$. Тогава за напрежението на комутиращия кондензатор окончателно се получава:

$$(10) \quad u_{Ck}(\vartheta) = \frac{I_m}{\omega C_k F} \left[\sin \alpha \left(\frac{1 - e^{-\frac{\delta \pi}{\omega \lambda}}}{2} \right) - e^{-\frac{\delta}{\omega} \vartheta} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{\lambda} \vartheta\right) \right].$$

Максималната стойност на напрежението на комутиращия кондензатор се намира лесно от горния израз:

$$(11) \quad u_{Ckm} = u_{Ck}(0) = -\frac{I_m}{\omega C_k F} \sin \alpha \left(\frac{1 + e^{-\frac{\delta \pi}{\omega \lambda}}}{2} \right).$$

Времето за възстановяване се определя от момента, когато обратното напрежение на тиристора стане равно на 0.

$$(12) \quad u_{\sigma\varphi} = u_{Lk1} - u_d = \frac{L_{k1}}{L_{k1} + L_{k2}} u_{Lk}(\vartheta) - U_d = \beta u_{Lk}(\vartheta) - U_d = 0,$$

където $\beta = \frac{L_{k1}}{L_{k1} + L_{k2}}$ е коефициент отразяващ начина на включване на комутиращата индуктивност, а L_{k1} - индуктивност включена в постояннотоковата верига на инвертора, L_{k2} - индуктивност включена в променливотоковата верига на инвертора.

От горните изрази се вижда, че времето за възстановяване зависи от разстройката на товарния кръг. В [Л2] е показано, че на практика

се предпочита кондензаторната разстройка на товарния кръг и затова по-надолу са дадени изрази валидни именно за този случай.

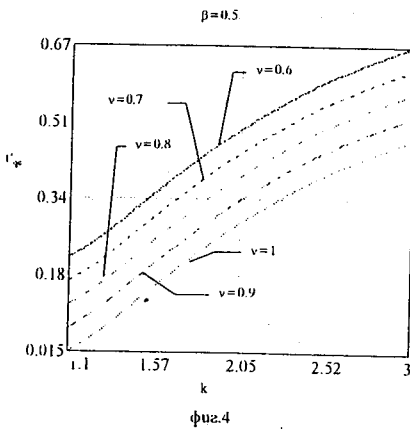
След преобразуване се получава:

$$(13) \beta \omega L_k F I_m e^{-\frac{\alpha}{\omega}} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\lambda} \vartheta\right) = U_d.$$

От решението на това уравнение се определя ъгъл ϑ_{qc} , отговарящ на схемното време за възстановяване $t_{qc} = \frac{\vartheta_{qc}}{\omega}$. Когато се работи в режим с пауза към това време се добавя и паузата $\tau = \frac{\pi}{\omega} - \frac{\pi}{\omega_0}$. Тогава общото време за възстановяване се получава:

$$(14) t_{qсoб} = t_{qc} + \tau$$

На фиг.4 е показано зависимостта на схемното време за възстановяване в относителни единици спрямо периода на инвертираното напрежение от коефициента на разколебаване k , коефициента на прекъснатост v (стойности на v 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 и 1) и разпределението на двете части на комутиращата индуктивност отразено чрез коефициента β .



Максимално обратно напрежение върху тиристорите се получава в момента $\vartheta = 0$:

$$(15) u_{обр.мах.} = -\beta u_{Lk}(0) + U_d = -U_d(2k\beta v F \sin\alpha - 1).$$

Максимално право напрежение върху тиристорите се получава в момента $\vartheta = \lambda$:

$$(16) u_{пр.мах.} = \beta u_{Lk}(\lambda) + U_d = U_d(2(k-1)\beta v F \sin\alpha + 1).$$

Изложената методика позволява да бъде анализиран РИ и при другите възможни схемни варианти (с разделен захранващ източник и с нулев извод на инверторния трансформатор), като се използват известните числови коефициенти [Л2], 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. Беркович Е. И., Г. В. Ивенский и др., “Тристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок”, Энергоатомиздат, Ленинград, 1983 г.

3. 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.

4. Бобчева М. Л., П. Тр. Горанов и др., “Ръководство за проектиране на силови електронни устройства”, Техника, София, 1991 г.

5. Brichant F., “L'ondistor”, Dunod, Paris, 1974.