

# МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА МОСТОВ РЕЗОНАНСЕН ИНВЕРТОР С ДОЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЯТА

ст.ас.инж.Николай Димитров Маджаров - ТУ Габрово  
гл.ас.инж.Николай Христов Ненов - ТУ Габрово

The problems of matching the load parameters to output quantities of the self-excited inverters in the induction heating devices are discussed in the paper. The attention is directed to the cases with low-ohmic loads which are inductors with a little number of windings.

Resonant inverter with dosing of the energy is offered to use. Its characteristics allow to decide simultaneously as the problems of the supplies without transformers as automatically matching of the variable loads to the output inverter quantities.

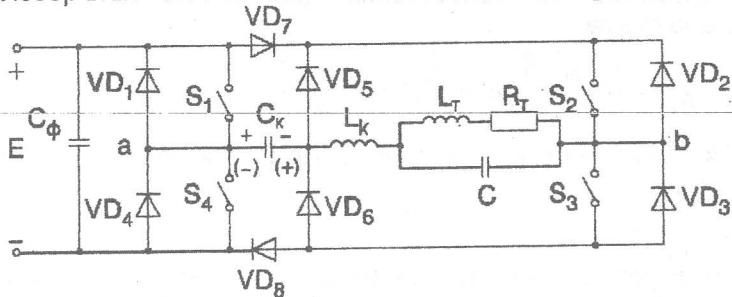
## I ВЪВЕДЕНИЕ

Основните аналитични зависимости на резонансния инвертор с дозиране на енергията (РИ с ДЕ) - фиг.1 са изведени въз основа на съотношенията от Хармоничния анализ (ХА) и постановките на единната теория на АИ [1,2,3]. Това позволи да се формират следните начални и задължителни етапи при проектирането на схемата:

1) Избор на съотношението  $\omega_{ск}/\omega$  ( $\omega_{ск}$  и  $\omega$  - честоти съответно на собствените колебания на променливотоковата верига (ПТВ) и на управлението) в зависимост от начина на действие на автономния инвертор (АИ) и съответните времедиаграми. Установено е, че при пауза между управляващите импулси  $t_0=0.1\pi$ , съотношението  $\omega_{ск}/\omega=1.2\div 1.4$ ;

2) Използване на последователна еквивалентна заместваща схема във всеки временен интервал, в рамките на един полупериод на управляващата честота;

3) Избор ъгъл  $\delta$  в ПТВ съгласно съотношението  $\operatorname{tg}\delta > \omega_{ск}/\omega$ .



Фиг.1

## II. МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА МОСТОВ РИ С ДЕ

Същността на проектирането се състои в определяне стойностите на всички пасивни елементи и фазови съотношения, осигуряващи условия за получаване на необходимата честота -  $\omega_{ск}$ .

От естеството на работа на АИ, т.е., от начина на ДЕ произтичат следните специфични свойства, предопределящи подхода при проектирането:

1) Енергията и мощността, консумирани от захранващия източник и предавани в товара винаги през кондензатора  $C_k$ , са неизменни и независещи от товарните параметри.

2) Напрежението  $U_{ck}$  на комутиращия кондензатор  $C_k$  е неизменно в интервала  $\theta_D + \pi - t_0$  и може да се разгледа като отсечена отдолу и отгоре косинусоида на ниво  $E$ .

3) При товар във вид на трептящ кръг, за самоподдържането на постоянна мощност и нулев ток на включване и изключване на ключовите прибори (КП), е необходимо променливите ток и напрежение на паралелния кръг да имат фаза  $t_0$ .

Заданието за проектирането включва следните входни данни:

1) Мощност на преобразувателя -  $P$  [kW]; 2) Работна честота -  $f$  [kHz]; Параметри на товара, в случая, фактор на мощността и характера на изменението му -  $\cos \phi$ .

Методиката за проектирането има следната последователност:

1) Първоначално се задава паузата  $t_0$ , в зависимост от работната честота и каталожните времена на включване и изключване на КП, например  $t_0 = 0,1\pi$ .

2) Конкретизира се стойността на отношението  $\omega_{ck}/\omega = 1,2+1,4$ , чрез апроксимиране времедиаграмата на променливия ток със синусоида.

3) Определя се фазовия ъгъл  $\delta$ , според фундаменталното съотношение [1] за АИ -  $\operatorname{tg} \delta > (1,2+1,4)\omega_{ck}/\omega$ .

4) Изчислява се качествения фактор на последователната заместваща схема

$$Q = \frac{\omega L_k}{R_e} = \frac{1}{2} \left( \frac{\omega}{\omega_{ck}} \right)^2 \left[ \operatorname{tg} \delta + \sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta - \left( \frac{\omega_{ck}}{\omega} \right)^2} \right] \quad (1)$$

5) По зададените мощност и честота се изчислява комутиращия капацитет  $C_k$

$$C_k = \frac{P}{4E^2 f} \quad (2)$$

6) Разстройката на паралелния кръг, при която напрежението и тока през него ще имат фаза -  $t_0$  се определят с израза:

$$\xi_0^2 = \frac{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \psi} \quad (3)$$

Поради несинусоидалната форма на променливия ток, фазовият ъгъл  $\psi$  се дефинира с израза  $\psi = \phi_1 - t_0$ , където  $\phi_1$  е фаза на първата хармонична на променливия ток. От извършените многократни пресмятания и изследвания относно формата и параметрите на токовия импулс,

може да се препоръча проектирането да започне при най-малката стойност на ъгъл  $\psi$ , за която паралелния кръг е в резонанс, т.е.  $\psi \approx 0$ .

7)За избраната стойност на  $\operatorname{tg}\delta$  (8) се определят реалната и относителната стойност на еквивалентното съпротивление на товара.

$$R_e = \frac{1}{\omega C_k \operatorname{tg}\delta} \quad (4)$$

$$R'_e = \frac{\xi_0^2 \operatorname{ctg}\phi}{(\xi_0^2 - 1)^2 + \operatorname{ctg}^2\phi} \quad (5)$$

8)Стойността на паралелния кондензатор  $C$  се намира чрез обобщения параметър  $a = C/C_k$ , от израза за фазовия ъгъл в ПТВ.

$$\operatorname{tg}\delta = a / R'_e + \operatorname{tg}\phi \quad (6)$$

9)От условието за резонанс на товарния кръг се определят необходимите еквивалентни параметри  $R_T, L_T$  и напрежение на индукционния нагревател

$$R_T = \operatorname{ctg}\phi \cdot \omega L \quad (7)$$

$$L_T = \frac{1}{\xi_0^2 \omega^2 C} \quad (8)$$

$$U_{Tm} = \frac{\sqrt{2PR}}{\cos\phi} \quad (9)$$

Начина на изчисляване на напрежението  $U_T$  предопределя известна специфика в проектирането на този вид АИ. Физическата същност на получаване на напрежението  $U_T$  е следствие от особеностите на метода на ДЕ, състоящи се във фиксиране мощностното ниво и напрежението на кондензатора  $C_k$ , при нулеви стойности на променливия ток в моментите  $0$  и  $\pi - t_0$ . По тази причина точната стойност на напрежението  $U_T$  се определя не от изчислителната процедура на индукционния нагревател (ИН), а от избраните инверторни параметри  $\omega_{ck}/\omega$  и  $\delta$ . Тук трябва да се направи уточнението, че така полученото напрежение  $U_T$  не е единствено възможно за конкретните стойности на комутиращите елементи на АИ. При промяна на еквивалентните параметри на товара, в следствие разтоварване на ИН или смяната му с друг, изискващ различно от така изчисленото по (9) напрежение, мощността с която работи АИ се запазва. Необходимото напрежение върху кръга се получава благодарение на вътрешния автоматизъм на АИ и свойството му да се адаптира към конкретния товар при неизменна мощност. Единствено в тези случаи се забелязва промяна в режима на работа, т.е. КП включват и изключват при ненулев ток. Посредством изменение на управляващата честота, чрез СУ от вида PLL, може да се постигне отново необходимото и достатъчно условие за комутация на КП при нулев ток (КНТ), състоящо се в поддържане на фаза  $t_0$  между напрежението и тока на паралелния кръг.

10) Момента-  $\Phi_D$  на вклъчване на дозиращите диоди  $VD_3$  и  $VD_4$ ,

фиксиращ края на интервала, през който се консумира енергия от захранващия източник при използване на условието

$$u_{ck}(\vartheta_D) = \frac{1}{\omega C_k} \int_0^{\pi - \vartheta_D} i(\vartheta) d\vartheta = E \quad (10)$$

се получава от вида:

$$\vartheta_D = \frac{\pi}{\omega_{ck}/\omega} - \frac{\operatorname{arctg} 2Q \omega_{ck}/\omega}{\omega_{ck}/\omega} \quad (11)$$

$$11) \text{От израза } U_{TM} = U_{TM} \sin \delta = \frac{U_{CKM} \cos \delta}{\sin \delta} = \frac{E}{\cos \frac{\pi - \vartheta_D}{2}} \operatorname{ctg} \delta$$

$$\text{се изчислява } \tau = \pi - \vartheta_D \quad \tau = 2 \arccos \frac{E \operatorname{ctg} \delta}{2U_{TM}}$$

12) Извършва се проверка и при необходимост уточняване стойността на  $\omega_{ck}/\omega$ , чрез итерационна процедура и съвместното решаване (1), (3), (11).

13) С получената от т.4 стойност на параметъра Q се изчислява комутиращата индуктивност  $L_K$

$$L_K = \frac{QR_e}{\omega} \quad (12)$$

14) Максималните стойности на напреженията  $U_{TM}$  и  $U_{CKM}$  са съответно равни:

$$U_{TM} = \frac{U_{TM}}{\cos \delta}, \quad U_{CKM} = U_{TM} \sin \delta = \frac{E/2}{\cos \frac{(\pi - \vartheta_D)}{2}} \quad (13)$$

15) Средните и максимални стойности на тока през КП и диодите се определят със следните изрази:

$$I_{MS_{1+4}} = I_{MVD_{7+8}} \frac{E}{\frac{\omega_{ck}}{\omega} \omega L_K} e^{-\frac{\vartheta_m}{2Q}} \sin \frac{\omega_{ck}}{\omega} \vartheta_m \quad (14)$$

Момента  $\vartheta_m$  е аргумента на екстремума  $di(\vartheta)/d\vartheta = 0$  т.e.,

$$\vartheta_m = \frac{\operatorname{arctg} 2Q \frac{\omega_{ck}}{\omega}}{\frac{\omega_{ck}}{\omega}}$$

$$I_{0S_{2+3}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(\vartheta) d\vartheta = Ef C_k \left( 1 - e^{-\frac{\pi - t_0}{2Q}} \right) \quad (15)$$

$$I_{0S_{1+4}} = I_{0V D_{7+8}} = \frac{E f C_k}{2} = \frac{I_0}{2} \quad (16)$$

$$I_{MVD_{5+8}} = i(\vartheta_D) = \frac{E}{\frac{\omega_{ck}}{\omega} \omega L_K} e^{-\frac{\vartheta_D}{2Q}} \sin \frac{\omega_{ck}}{\omega} \vartheta_D \quad (17)$$

$$I_{0VD_{5,8}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-\theta_D} i_{dd}(\vartheta) d\vartheta = Ef C_K e^{-\frac{\lambda}{2Q}} \quad (18)$$

16) Средния ток, консумиран от захранващия източник, се определя от съотношението, изразяващо неизменна мощност в АИ:

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi-\theta_D} i(\vartheta) d\vartheta = Ef C_K \quad (19)$$

От извършеното съвместно проектиране и анализ на схемата, при различни входни параметри и товари, се установи добро съвпадение на стойностите, както на схемните елементи, така и на величините характеризиращи работата на КП и АИ. Грешката не превишава 10%. Единствено по-голямо е различието за стойността на индуктивността  $L_K$  - от компютърния и реалния експеримент тя е по-голяма с около 20%. Несъвпадението се отрази на работния режим на АИ, състоящо се в получаване на режим с естествено изключване на КП, преди края на управляващите импулси. Това състояние на ЕМП е характерно за случая, когато през интервала  $\theta_D + \pi - t_0$ , в ПТВ има не само индуктивност  $L_K$  и еквивалентно съпротивление  $R_E$ , но и еквивалентен капацитет  $C_E$ . Причината за получаване от паралелния кръг на този еквивалентен капацитет се състои в несинусоидалната форма на променливия ток. Токовият импулс притежава фаза  $\phi_1$ , която обикновено е по-голяма от паузата  $t_0$ . Описаното явление формира положителни стойности на ъгъл  $\psi = \phi_1 - t_0$ , съответствуващи на капацитивна разстройка на паралелния трептящ кръг. За компенсирането на този допълнителен капацитет е необходимо увеличаване стойността на индуктивността  $L_K$ .

Независимо от малката процентна грешка която експертно лесно се отстранява, предвид строгоото дефиниране режима на работа на АИ чрез точните стойности на схемните елементи, се извършва следната изчислителна процедура по корекция стойността на индуктивността  $L_K$ .

1) Изчислява се необходимото увеличаване  $\Delta L_K$ .

$$\Delta L_K = \frac{tg \psi R_E}{\omega} = \frac{tg(\phi_1 - t_0)}{\omega} R_E$$

2) Определя се ъгъл  $\phi_1$  съгласно строгоото дефинираната връзка между формата на токовия импулс и коефициента  $K_{\phi_1}$  [1].

$$\phi_1 = \frac{t_0}{2} K_{\phi_1} = 1,35 \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{ck}}\right) = 2,12 \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{ck}}\right) rad = 121,5 \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{ck}}\right)^\circ el$$

3) Отчитайки доминиращата роля на ъгъл  $\phi_1$ , при определяне стойността на индуктивността  $L_K$ , е целесъобразно в някои случаи да се изчисли точната му стойност. Това се осъществява чрез коефициентите  $a_1$  и  $b_1$  от реда на Фурье.

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \left[ \int_0^{\theta_D} \frac{E}{\omega_{ck} \omega_K} e^{-\frac{\theta}{2Q}} \sin \frac{\omega_{ck}}{\omega} \vartheta \cos \vartheta d\vartheta + \int_0^{\pi - t_0 - \theta_D} i(\vartheta_D) e^{-\frac{\theta}{Q}} \vartheta \cos(\vartheta + \vartheta_D) d\vartheta \right]$$

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \left[ \int_0^{\theta_D} \frac{E}{\omega_{ck} \omega_L K} e^{-\frac{\theta}{2Q}} \sin \frac{\omega_{ck}}{\omega} \vartheta \sin \vartheta d\vartheta + \int_0^{\pi - t_0 - \theta_D} i(\vartheta_D) e^{-\frac{\theta}{Q}} \vartheta \sin(\vartheta + \vartheta_D) d\vartheta \right]$$

$$\operatorname{tg}\phi_1 = \frac{a_1}{b_1}$$

4) Определя се необходимата стойност на комутиращата индуктивност

$$L_K = L_{KI} + \Delta L_K \quad (20)$$

### III. ТЕОРЕТИЧНИ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ИЗВОДИ

С така създадената методика е проектиран, реализиран и изследван мостов РИ с ДЕ, при следните входни данни: 1)  $P=15kW$ ; 2)  $f=20kHz$ ; 3)  $E=500V$ ;  $\cos\phi_T=0.17$ ;  $t_0=0.1\pi$ . В табл.1 е извършено сравнение на резултатите от изчисленията и от компютърния експеримент. Основните времедиаграми на разглеждания АИ и някои характерни техни моментни стойности са представени на фиг.2 в следния ред: на фиг.2 а - променливия ток в диагонала на АИ; фиг.2 б - напрежението на комутирация (дозиращ) кондензатор; фиг.2 в - напрежението на паралелния товарен кръг.

табл.1

$P=15kW, f=20kHz, E=500V, R_s=0.2\Omega, L=9.36\mu H, L_t=44\mu H, C_d=0.75\mu F, C_o=7\mu F$									
величина	$\varphi_m$ , °ел	$\varphi_D$ , °ел	$U_{Tm}$ , V	$I_0$ , A	$I_{mKP}$ , A	$I_{OKP2,3}$ , A	$I_{mDD}$ , A	$I_{oDD}$ , A	$I(\pi-t_0)$ , A
изчислена	46	93	465	30	81	18,2	48	3,2	2
компютрен експеримент	49	95	471	30	83	18,46	50	3,46	1,2

Основните резултати, получени от разработените в настоящата работа теоретични и научно-приложни проблеми, се свеждат до следното:

1) Създадена е методика за проектиране на силовата схема, на мостовия РИ с ДЕ, притежаваща удовлетворителна за практиката точност.

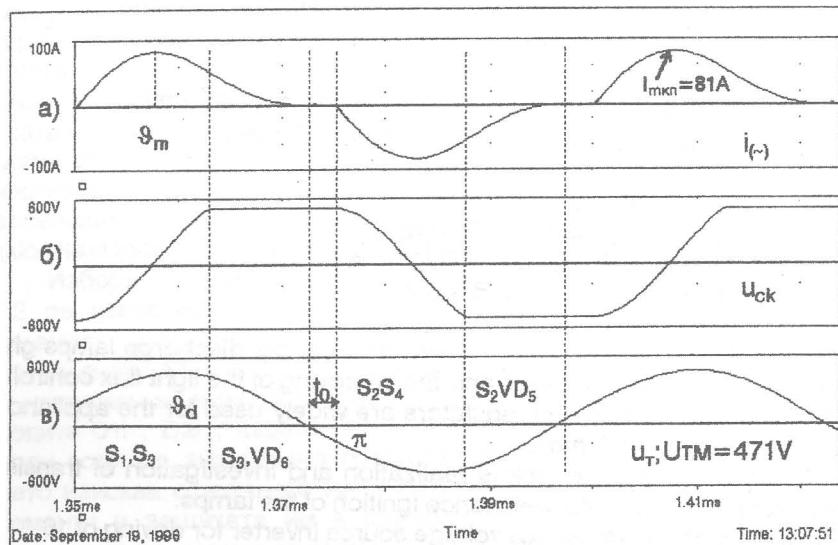
2) Параметрите на токовия импулс през КП се получават с голяма достоверност, като разликата по никой от тях не надвишава 10%.

3) Отчетен е несинусоидалния характер на променливия ток и в съответствие с това е създадена корекционна процедура за стойността на индуктивността  $L_K$ .

4) Получените електрически и фазови съотношения позволяват да се

сравняват функционалните възможности на мостовия и полумостовия РИ с ДЕ и на тази основа да се дефинират областите им на приложение:

- за полумостовия РИ с ДЕ - при товарни напрежения  $U_T = 200V \div 250V$ ;
- за мостовия РИ с ДЕ - при товарни напрежения  $U_T = 400V \div 500V$ ;



Фиг.2

5) Помърди се свойството на мостовия РИ с ДЕ да поддържа постоянна мощност в товара, за различни комбинации на товарните параметри, при осигуряване на КНГ на КП. Тази адаптивност и самосъгласуващи свойства го правят много гъвкав и удобен за използване в качеството му на широкодиапазонен източник на високочестотна енергия.

Научно - приложните резултати са по тематика на договор ТН - 457/94, сключен по фонд „Научни изследвания“ към МОНТ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тодоров Т.С., Маджаров Н.Д., Алексиев Д.Т., Иванов П.Т. Автономни инвертори. Габрово 1996г.
2. Todorov T.S., Madgarov N.D., Alexiev D.T., Ivanov P.T. Adaptive Resonant Inverter for Electrotherapeutics. Proc. PCIM'95, Power Conversion, Nürnberg, Germany, 1995.
3. Маджаров Н.Д., Мостов автономен инвертор с дозиране на енергията. Сборник доклади научно-приложна конференция ET'96, Созопол 1996