

## ЕНЕРГЕТИЧНИ СЪОТНОШЕНИЯ ПРИ ТРАНСФОРМАТОРНА КОМУТАЦИЯ, ИЗПОЛЗУВАНА В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИТЕ НА ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

н.с. к.т.н. Евелин Цонев Цонев, гл.ас. Стефан Колев Станев,  
доц. к.т.н. Христо Петров Хинов, ст.ас.Петър Томчев Иванов,ТУ - Габрово

Един от основните проблеми при тиристорните преобразуватели с еднооперационни тиристори е проблемът, свързан с комутацията на тока [1]. Една от страните на този проблем е свързана с количеството енергия, необходима за осъществяването на надеждна комутация и типа на енергозапасяващия елемент. Този проблем е от особена важност при преобразувателите на високо напрежение.

Разнообразието на методите и свързаните с тях схемни решения, които могат да се използват при осъществяването на процеса на комутация е голямо [4]. Това прави извършването на енергетична оценка, обхващаща това разнообразие, изключително сложно. Ето защо този проблем се разглежда конкретно за методите на трансформаторна комутация [3], осигуряваща предимствата на галваничното разделяне между силова и комутационна верига.

Анализът се извършва за представената на фиг. 1а силова тиристорна верига, съдържаща високоволов източник  $E_1$ , активен товар  $R_1$ , индуктивност на първичната намотка на комутационния трансформатор  $L_1$ , силова тиристорно-диодна група  $T_1 - D_1$ . На веригата се въздействува с: индуктивен комутатор  $KL$  (фиг.1 б), съставен от  $L_{21}$ ,  $C_{21}$ , нисковолов източник  $E_2$ , ключ  $S1$ ; капацитивен комутатор  $KC$  (фиг. 1 в), съдържащ  $L_{22}$ ,  $C_{22}$ , зарядно устройство  $ZU$  и ключ  $S2$ . При  $KL$  комутационната енергия се запасява в индуктивността  $L_{21}$ , а при  $KC$  в кондензатора  $C_{22}$ . Като схемно решение двата комутатора са идентични. Съществената разлика между тях е определена от принципа на работа: при комутатора от фиг. 1 б се използва запасена магнитна енергия; процесът на комутация започва при запушване на ключовия елемент  $S1$ , като от съществено значение е стойността на отрицателната производна на тока в  $KL$  [2]. При комутатора от фиг. 1 в се използва запасена капацитивна енергия. Процесът на комутация започва при отпушване на ключовия елемент  $S2$  и се определя от положителния фронт на тока в  $KC$  [3].

Трябва да се подчертае, че анализираната система - силова верига - комутатор - може да бъде разгледана като структурна единица на многофазна инверторна схема.

Въведен е коефициент на използване на енергията  $K_w$

$$(1) K_w = W_1 / W_k,$$

където:  $W_1$  е отделената в товара енергия;  $W_K$  - запасената в комутатора енергия.

Целта на анализа е оценка на коефициента  $K_W$  за комутаторите KL и KC и доказване предимствата на комутатора със запасена магнитна енергия. Анализът се извършва при условие:

$$(2) \quad 1 / (L_{21} C_{21}) = 1 / (L_{22} C_{22}),$$

определящо еднакви обобщени параметри на преходния процес в схемите на KL и KC.

На представените на фиг. 2 и фиг. 3 времедиаграми се обособяват два интервала в работата на високоволтовата и комутационната вериги. За тиристорната верига това са интервалите  $t_1$  на отпушен тиристор и  $t_2$  на комутация. В схемите на KL и KC в течение на интервала  $t_0$  се запасява енергия, докато през  $t_2$  се реализира комутационното въздействие. Оценката на коефициентите  $K_{WL}$  и  $K_{WC}$  и на отношението  $K_{WL} / K_{WC}$  се извършва при условие постигане на еднакви амплитуди на комутационния ток  $i_K$  през силовата тиристорно-диодната група при използване съответно на KL и KC.

Запушването на тиристора на фиг. 1 а се описва от системата диференциални уравнения (СДУ):

$$(3) \quad E_1 = i_1 R_L + L_1 \frac{di_1}{dt} + (\mp) M_1 \frac{di_2}{dt}$$

$$X = L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_{20}} \int i_2 dt + (\mp) M \frac{di_1}{dt}$$

където:  $X = E_2$  за KL;  $X = U_0$  за KC.

Ако моментът, в който започва комутацията, се избере условно за нулев, началните условия съответно за KL и KC са:

$$(4) \quad i_{1L}(0) = E_1 / R_1 + E_2 K_{ML}^2 K_{t0L} / R \approx E_1 / R_1;$$

$$i_{2L}(0) = E_2 / L_2 [ t_{0L} + K_{ML}^2 L_1 K_{t0L} / R_1 ] \approx E_2 t_{0L} / L_2;$$

$$u_{C21}(0) = 0; K_{t0L} = 1 - \exp(-R_1 t_{0L} / [L_1 (1 - K_{ML}^2)]); K_{ML}^2 = M_L^2 / (L_1 L_2);$$

$$(5) \quad i_{1C}(0) = E_1 / R_1; \quad i_{2C}(0) = 0; \quad u_{C22}(0) = U_{0L}$$

Решаването на СДУ с помощта на операторния метод води до резултат:

$$(6) \quad I_1(p) = i_1(0) / p - I_K(p)$$

$$(7) \quad I_K(p) = \frac{M}{L_1 L_2} \cdot \frac{1}{(1 - K_M^2)} \cdot \frac{\sum_{n=0}^1 a_n p^{1-n}}{\sum_{n=0}^3 b_n p^{3-n}}$$

$b_0 = 1; b_1 = R_1 / [L_1 (1 - K_M^2)]; b_2 = 1 / (L_2 C_2); b_3 = (R_1 / L_1) \cdot 1 / (L_2 C_2) \cdot 1 / (1 - K_M^2)$ ,  
където: за KL  $a_{0L} = -E_2$ ;  $a_{1L} = i_2(0) / C_{21}$ ; за KC  $a_{0C} = U_0$ ;  $a_{1C} = 0$ .

Величината  $I_K(p)$  е операторният образ на комутационния ток  $i_K$ , индуциран в силовата верига, който съдържа аperiодична и колебателна съставки с обобщени параметри:  $\delta_1, \delta_2$  и  $\omega_2$  като  $\omega_{02}^2 = \omega_2^2 + \delta_2^2$ . При условието  $\delta_1 \gg \delta_2$  физически налагащо се е възможно поради наличието на високочестотна силова верига аналитично определяне с уравнение от 2 ред на обобщените параметри с достатъчна точност. За тока в силовата верига се получава:

$$(8) \quad i_1(t) = i_1(0) - i_K(t),$$

където:

$$(9) \quad i_{KL}(t) = A_{KL} \exp(-\delta_1 t) + B_{KL} \exp(-\delta_2 t) \sin(\omega_2 t - \varphi_{KL}) \text{ като } \varphi_{KL} \rightarrow 0$$

$$(10) \quad i_{KC}(t) = A_{KC} \exp(-\delta_1 t) + B_{KC} \exp(-\delta_2 t) \cos(\omega_2 t - \varphi_{KC}) \text{ като } \varphi_{KC} \rightarrow 0$$

Токовете в комутаторите имат вида:

$$(11) \quad i_{2L}(t) = A_{2L} \exp(-\delta_1 t) + B_{2L} \exp(-\delta_2 t) \cos(\omega_2 t + \varphi_{2L}) \text{ като } \varphi_{2L} \rightarrow 0$$

$$(12) \quad i_{2C}(t) = A_{2C} \exp(-\delta_1 t) + B_{2C} \exp(-\delta_2 t) \sin(\omega_2 t + \varphi_{2C}) \text{ като } \varphi_{2C} \rightarrow 0.$$

За амплитудите на  $i_K$  се получават изразите:

$$(13) \quad i_{KLm} = B_{KL} \exp(-\delta_2 t_m) \text{ при } t_m = 1/\omega_2 \arctg(\omega_2/\delta_2)$$

$$(14) \quad i_{Kcm} = B_{KC}$$

За характерното за колебателния процес съотношение  $\omega_2 \gg \delta_2$  е справедливо  $\omega_{02} \approx \omega_2$ , при което (11) и (12) придобиват съответно вида:

$$(15) \quad i_{KLm} = i_{2L}(0) (\rho_2/R_1) n K_M \exp(-\delta_2 t_m),$$

където:  $\rho_2 = (L_{21}/C_{21})^{0.5}$ ;  $n = w_1/w_2$ ;  $w_1$  и  $w_2$  - брой намотки в трансформатора:

$$(16) \quad i_{Kcm} = U_0 K_M / [(L_1 L_{22})^{0.5} (1 - K_M^2) \delta_1].$$

Като се имат пред вид поставените условия, при които се извършва анализа ( $\delta_1 \gg \delta_2$ ,  $\omega_{02} \approx \omega_2$ ,  $i_{KLm} = i_{Kcm}$ ), то може да се получи съотношение за схемните времена на запушване  $t_{qL}$  и  $t_{qC}$  на силовия тиристор, които се осигуряват съответно от комутаторите KL и KC.

$$(17) \quad t_{qL} = \pi - 2 \arcsin(i_1(0)/i_{KLm}) = 2 t_{qC}.$$

Запасената съответно в KL и KC енергия е:

$$(18) \quad W_{KL} = W_L [1 - 2\delta_2 I_1(0) \exp(-\delta_2 t_m) / (\omega_2 i_{KLm})]; \quad W_L = [L_{21} \cdot i_{2L}^2(0)]/2$$

$$(19) \quad W_{KC} = W_L [\omega_{02} \exp(-\delta_2 t_m) / \omega_2]^2.$$

Отношението на съответните коефициенти на използване се определя от:

$$(20) \quad K_{WL}/K_{WC} = (1 + K^2) / [\exp z [\exp z - (2 K i_1(0) / i_{Kcm})],$$

където:  $z = K \arctg 1/K$ ;  $K = \delta_2/\omega_2$ .

Стойностите на (20) при  $K \in (0 \div 0,1)$  са:

$$(21) \quad (K_{WL}/K_{WC}) \in (1 \div 0,823) \text{ при } i_{Kcm}/i_1(0) = 2;$$

$$(22) \quad (K_{WL}/K_{WC}) \in (1 \div 0,91) \text{ при } i_{Kcm}/i_1(0) \leq 1.$$

Трябва да се отбележи, че при оценка на това отношение е разгледан утежен случай за KL, тъй като не са отчетени енергийните загуби в зарядното устройство на КС.

От (21) и (22) следва, че еднакви амплитуди на комутационните токове в KL и КС се получават при приблизително еднакви запасени енергии. Наред с това (11) и (12) показват, че KL осигурява два пъти по-голямо време за запушване на тиристора в силовата верига.

Енергията в товара е :

$$(23) \quad W_1 = E_1 i_1(0) t_1.$$

От (18) и (23) при  $t_1 \geq t_0$ ,  $c = i_1(0) / i_2(0) < 1$ ,  $M / L_2 < 1$  се получава:

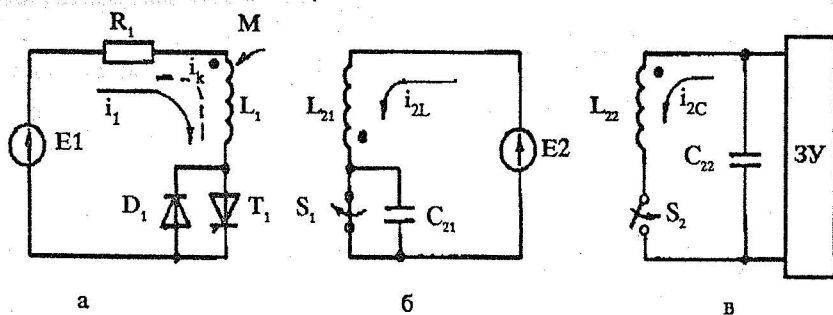
$$(24) \quad K_{WL} = W_1 / W_{KL} > 2 E_1 c / [E_2 (1 - n c K_{ML})],$$

което показва, че в комутатора със запасена магнитна енергия ефективно може да се използва нисковолтав източник  $E_2$  [1]. При  $E_1 = 1000 \text{ V}$ ,  $E_2 = 12 \text{ V}$  и  $c \geq 0,15$  се получава  $K_{WL} \geq 29,42$ , т.е.  $W_{KL} \approx W_{КС}$  е по-малка от  $0,034 W_1$ . Тези количествени оценки на коефициента на използване на комутационната енергия  $K_W$  са справедливи за честоти  $f \leq f_{\max} \approx 1 / t_0$ .

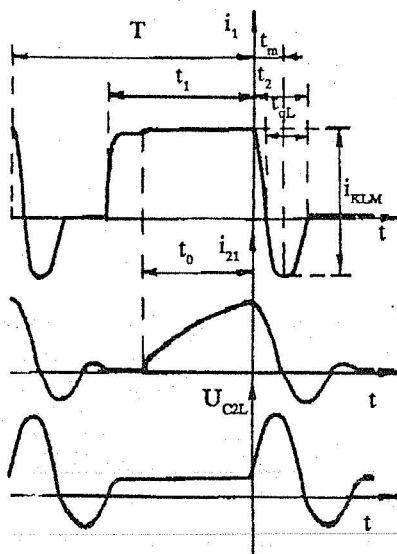
Направеният анализ доказва предимството на комутатора със запасена магнитна енергия: при осигуряване на равни запасени енергии в KL и КС и при еднакви амплитуди на комутационните токови съставки ( $i_{KL,m} = i_{КС,m}$ ) се получава:  $t_{qL} = 2t_{qC}$ . Този анализ позволява и изчисляването на запасената енергия в комутаторите KL и КС, необходима за осъществяване на надежден комутационен процес.

#### ЛИТЕРАТУРА

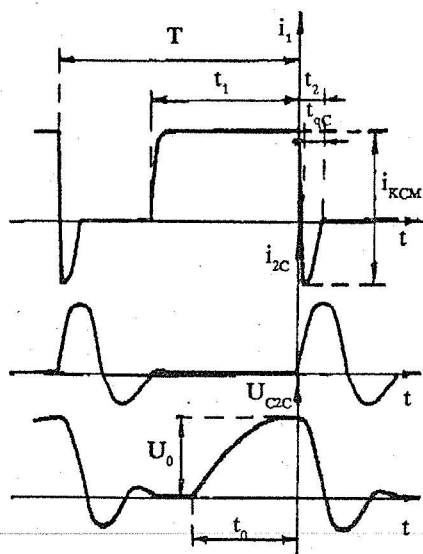
1. Цонев, Е., Х. Хинов, Д. Василев, Приложение на трансформаторната комутация при преобразователите на високо напрежение, Втора национална научно-приложна конференция „Електронна техника - 93“, Созопол, 1993.
2. Цонев, Е., Х. Хинов, Преобразовател DC - AC, Юбилейна научна сесия, организирана от ВВОО „В.Левски“, ВТУ „Св.Св. Кирил и Методий“, Съюз на учените в България, клон В.Търново, 1993.
3. Хинов, Х., Е.Цонев, М. Аврамов, Инвертор с трансформаторна комутация, „Техническа мисъл“ кн.3, 1990, 31 - 33.
4. Табаков, Ст., Тиристорна техника, С., Техника, 1980.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

# ENERGETIC INTERRELATIONS IN TRANSFORMER COMMUTATION OF HIGH POWER CONVERTERS

Tzonev E., St. Stanev, Ch.Chinov, P. Ivanov

## Abstract

The problem of forced transformer current commutation in high-voltage converter is reported. Static and switching processes in the consisted of thyristor and commuting circuit system are analysed.

The analysis is performed for commuting circuit with stored magnetic and electric energy, respectively. The coefficient of utilization of stored energy for each kind of commuting circuit is calculated.

Specific advantages of each circuit are evaluated.