

Условия за оптимална комутация на полумостов DC/DC преобразувател комутирани при нулево напрежение и нулев ток
гл. ас инж. Венцислав Цеков Вълчев, Доц. д-р Димитър Димов Юдов
Технически Университет – Варна

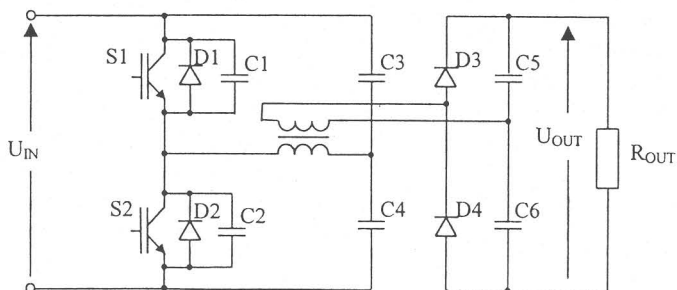
The switching conditions of the proposed converter are dependant on the dimensioning of the converter components and zero-voltage and zero-current switching can be achieved. The aim of the presented paper is the analysis and investigation of the optimal switching conditions and their dependence on the load and the component values.

The expression of the current of the switches at the turn off moment I_{OFF} has been derived. The range of the correlations of converter component values, which provide zero-voltage and zero-current switching have been defined. Moreover, the converter has been analysed for enlarging the optimal switching interval and the methods for improving the possible derivations of the switching conditions have been derived.

Key words: soft switching, DC/DC converters

1. Въведение.

Решаването на въпроса с условията на комутация на силовите ключове в мощните полупроводникови преобразуватели е от основно значение за повишаване к.п.д. на преобразувателите, за намаляване на нежеланите електромагнитни излъчвания и за повишаване на надеждността на устройствата. В [1] е предложен полумостов DC/DC преобразувател, комутирани при нулево напрежение и нулев ток (ПМП) - фиг.1., който благодарение на оптималните условия на комутация и оттук високия си к.п.д., е подходящ за множество приложения, в който е необходим 'постояннотоков трансформатор' с висок к.п.д.



Фиг.1. Полумостов DC/DC преобразувател комутирани при нулево напрежение и нулев ток.

Условията на комутация и принципа на работа на схемата са в пряка зависимост от подбора на елементите и както е изяснено в [1], при подходящо оразмеряване се постига нулево напрежение и нулев ток на отпушване и на

запушване на ключовете. Целта на настоящата статия е изследването и анализа на условията за тази оптимална комутация и зависимостта им от товара и параметрите на преобразувателя.

2. Изложение.

2.1. Условия за оптимална комутация при запушване на ключовете на ПМП.

Оптимални условия на комутация при запушване на полупроводников ключ има, ако в процеса на комутация токът през ключа е нула или близък до нула. Такъв режим, съгласно [1] се получава за ключовете на ПМП при условие:

$$t_{ON} \geq \pi \sqrt{L_S (C3 + C4)}, \quad (1)$$

където $L_S = L_{S1} + L_{S2}$ е индуктивността на разсейване на трансформатора.

Токът на през ключовете в момента на комутация може да се изрази чрез формулата:

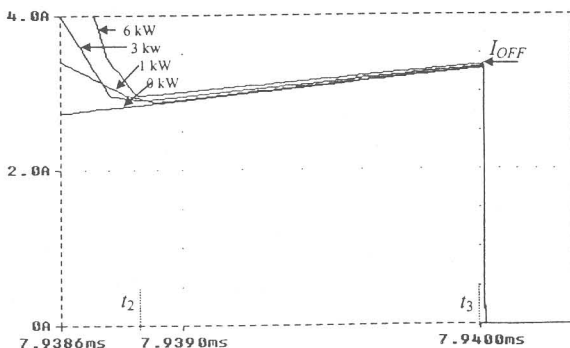
$$I_{OFF} = i_{L\mu}(t_3) = \frac{U_{IN} t_{ON}}{4 L_{\mu}}, \quad (2)$$

където:

- L_{μ} е намагнитващата индуктивност на трансформатора;
- t_{ON} е времето, през което към ключа е подаден отпущащ сигнал;
- U_{IN} е входното напрежение.

Верността на формулата (2) се потвърждава от минималната разлика между изчислената по формулата стойност на I_{OFF} и стойностите на същия ток, получени при проведеното изследване на схемата с PSPICE за различни стойности на товара (фиг.2.) При $U_{IN} = 400V$; $t_{ON} = 16\mu s$ и $L_{\mu} = 500\mu H$ и използване на (2):

$$I_{OFF} = \frac{400 \cdot 16 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 500 \cdot 10^{-6}} = 3,2 A, \quad (3)$$



Фиг.2. Ток на ключа S3 през временитервала $t_2 \div t_3$ при различни стойности на товара: I_{OFF} – ток на ключа в момента на запушването му - t_3 :
 $P_{OUT} = 0; 1; 3; 6 kW$;
 $U_{IN} = 100V$; $U_{OUT} = 400V$;
 $L_{\mu} = 500\mu H$; $L_S = 2,5\mu H$;
 $t_{ON} = 16\mu s$, $t_{OFF} = 4\mu s$.

На фиг.2. е показан токът през ключа при използване на същите данни на преобразувателя при различни стойности на товара.

От изложеното може да се направят **два извода**:

1. Токът на ключа в момента на запусването му I_{OFF} , практически не зависи от товара и може да се изчисли при използване на формула (1), като отклонението от действителната стойност е минимално.
2. За намаляване на тока на комутация на ключовете е необходимо увеличаване стойността на L_{μ} .

Напрежението върху ключовете по време на запусването им се определя процеса на заряд на кондензаторите $C1$ и $C2$. При средномощни и мощни преобразуватели IGBT са доминантни ключове. Като се има в предвид, че тока в момента на комутация при ПМПТ може да се намали до няколко процента ($3 \div 5\%$) от максималния ток на ключа и се вземат предвид проведените изследванията върху комутационните загуби при запусване на IGBT, може да се направи извода, че за същественото намаляване на комутационните загуби е достатъчно времето на заряд на $C1(C2)$ $T_{3,4}$ да е равно или по-голямо от времето на т.н. 'токова опашка'. Подобни са и поместените в [2] резултати. При различните типове IGBT това време варира в диапазон $200ns \div 1000ns$. Следователно за осигуряване на оптимални условия при запусване на ключовете времеинтервала за презаряд на кондензаторите $C1, C2$ трябва да е съобразен със споменатото време. Като се има в предвид факта, че тока през намагнитващата индуктивност на трансформатора L_{μ} не се променя до момента на пълния заряд на кондензатора $C1$ и може да се изрази с (2), то времеинтервала на заряд се дава с формулата:

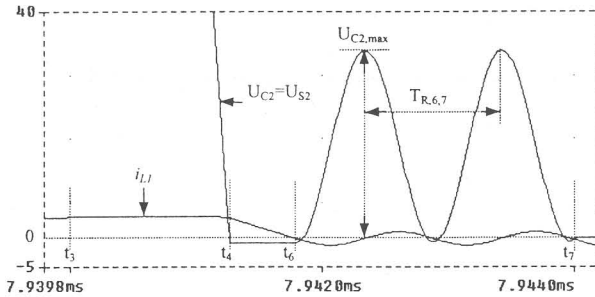
$$T_{3,4} = \frac{U_{IN} C1}{I_{OFF} / 2} = \frac{8 \cdot C1 \cdot L_{\mu}}{t_{ON}} \quad (4)$$

Изразът (4) и изложените съображения за оптимална комутация определят необходимото минимално време t_{OFF} , през което и към двата ключа са подадени запусващи сигнали:

$$t_{OFF} = \frac{8 \cdot C1 \cdot L_{\mu}}{t_{ON}} \geq 0,2 \mu s \div 1 \mu s \quad (5)$$

2.2. Оптимални условия при отпушване на ключовете

Оптимални условия за отпушване на ключовете има при нулево напрежение върху тях в момента на комутация и наличие на минимален (или нулев) ток в комутируемата верига. След момента $t=t_4$ нулевото напрежение върху ключовете се запазва докато тече ток през първичната намотка на трансформатора (фиг.4.).



Фиг.4. Напрежение на ключа S4 U_{S4} и ток през първичната намотка на трансформатора i_{L1} при подаване на отпушващ сигнал към S4 (момент t_7) след смяна на посоката на i_L – момент t_6 .

Процесът, който определя продължителността на този подходящ за подаване на отпушващ сигнал времеинтервал, се определя от индуктивността на разсейване на трансформатора L_S , от токът в момента на комутация I_{OFF} и от променливата съставка на напрежението на кондензаторите C3 и C4 на делителя на напрежение $U_{C3}=U_{C4}$. След прилагане на общоприетите допускания и опростявания за този интервал се извежда формулата:

$$T_{4,6} = \frac{L_S I_{OFF}}{\Delta U_{C4}} = \frac{L_S U_{IN} t_{ON}}{L_{\mu} 4 \Delta U_{C4}} \quad (6)$$

От израза (6) следва, че за осигуряване на по-голяма продължителност на този интервал е необходимо намаляване на променливата съставка на напрежението на кондензаторите C3 и C4 и увеличаване на стойността на индуктивността на разсейване на трансформатора L_S .

Амплитудата на променливата съставка на напрежението на кондензаторите C3 и C4 може да се изрази като:

$$\Delta U_{C3} = \Delta U_{C4} = \frac{T \cdot I_{OUT}}{2 \cdot C4} \quad (7)$$

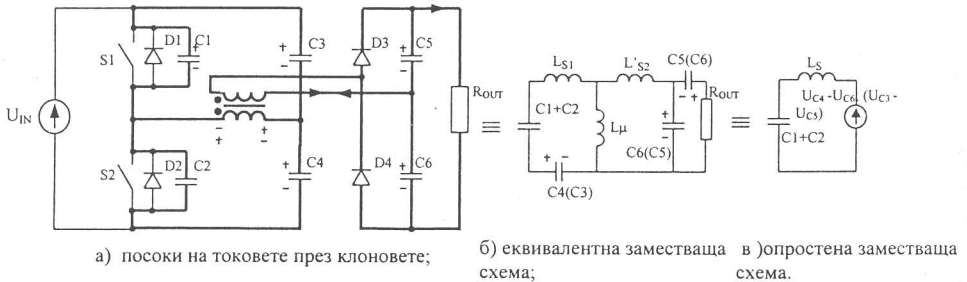
където $T = 2(t_{ON} + t_{OFF})$ е работният период на преобразувателя.

Тъй като амплитудата на променливата съставка на напрежението на кондензаторите C3 и C4 е правопрпорционална на товара, то съобразно зависимостта (6) времето $T_{4,6}$, през което напрежението на подлежащия на отпушване ключ е нулево, ще зависи обратнопропорционално от товара. Следователно, за осигуряване на нулево напрежение на отпушване на ключовете за широк диапазон на промяна на товара, отпушващият сигнал трябва да се подаде непосредствено след разреждането на съответния кондензатор C1,C2.

Ако подаването на отпушващ сигнал към ключа S2 е след смяната на посоката на тока през първичната намотка – момент t_6 , то в преобразувателя започва нов процес, който има резонансен характер. Последователно през всеки полупериод се отпушват диодите D5 и D6. Валидни са следните равенства на токовете:

$$i_{C1} = i_{C2} = i_{C3} = i_{C4} = i_{L\mu} / 2 \quad (8)$$

На фиг.5,а е показана схемата на затворените контури на токовете в преобразувателя за интервала $t_6 \div t_7$, на фиг.5,б е показана еквивалентната заместваща схема, а на фиг.5,в - съответната опростената заместваща схема.



Фиг.5. Състояние на ПМП за времеинтервал $t_6 \div t_7$:

При пренебрегване напрежението на диода D1(D2) в отпушено състояние, максималното напрежение върху кондензатора C1(C2) - $U_{C2,max}$ съобразно опростената заместваща схема от фиг.5,в може да се изрази като:

$$U_{C2,max} = 2 \cdot (U_{C4} - U_{C6}) \quad (9)$$

Използвайки, че напреженията на C4 и C6 практически не се променят за времеинтервала $t_6 \div t_7$ и че $U_{C4} = U_{IN} / 2 + \Delta U_{C4}$; $U_{C6} = U_{IN} / 2$, израза (8) се свежда до:

$$U_{C1,max} = 2 \cdot \Delta U_{C4} \quad (10)$$

Периода на резонансия процес, съобразно опростената заместваща схема от фиг.5,в е:

$$T_{R,6,7} = 2\pi \sqrt{(C1 + C2)L_S} \quad (11)$$

От направения анализ на режима, възникващ в случая на подаването на отпушващ сигнал към ключа след смяната на посоката на тока през първичната намотка следват изводите:

1. Максималната възможната стойност на напрежението върху ключовете в момента на отпушването им е право пропорционална на амплитудата на променливата съставка на напрежението на кондензаторите C3 и C4.

2. Намаляването на амплитудата на променливата съставка на напрежението на кондензаторите C3 и C4 чрез увеличаване на стойността им същевременно води и до увеличаване на продължителността на времеинтервала $T_{4,6}$, през който работи обратно паралелният диод и напрежението върху ключа е практически нула (това е оптималният за отпушване на ключа времеинтервал).

3. Заключение

Въз основа на проведените анализ и изследване на условията за оптимална комутация на представения полумостов DC/DC преобразувател, комутиран при нулево напрежение и нулев ток могат да се направят следните изводи:

1. Реализирането на оптимални условията за комутация на преобразувателя се определя от оразмеряването елементите му. При съблюдаване на изискванията: $C1=C2 \ll C3=C4 \ll C5=C6$ и $L_S \ll L_u$ и подбора на стойностите съобразно изложените формули, условията за комутация на преобразувателя не зависят от товара и предавателното отношение на трансформатора.
2. Токът на ключа в момента на запущването му I_{OFF} , практически не зависи от товара и намаляване на стойността му се постига чрез увеличаване на намагнитващата индуктивност на трансформатора, като е възможно I_{OFF} да бъде намален до 3÷5% от максималният ток през ключа.
3. За осигуряване на нулево напрежение на отпушване на ключовете за широк диапазон на промяна на товара, отпушващият сигнал трябва да се подаде непосредствено след разреждането на съответния кондензатор C1, C2.
4. Увеличаване на стойността на кондензаторите C3 и C4 води до увеличаване на продължителността на времеинтервала $T_{4,6}$, през който работи обратно паралелният диод и напрежението върху ключа е практически нула (това е оптималният за отпушване на ключа времеинтервал) и до право пропорционалното намаляването на максималната възможната стойност на напрежението върху ключовете в момента на отпушването им (в случай, че отпушващият сигнал не е подаден през времеинтервала $T_{4,6}$ на нулево напрежение върху ключа).

Литература:

- [1] Вълчев В., Юдов Д., 'Полумостов DC/DC преобразувател комутиран при нулево напрежение и нулев ток', Созопол, 1999.
- [2] Underland T., Petterteig A., 'IGBT turn off losses for hard switching and with capacitive snubbers', *IAS 26th Annual Meeting*, Michigan, pp. 1501-1507, Sept.28-Oct. 4, 1991.