

ЧЕСТОТНО РЕГУЛИРАНЕ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛЕН ИНВЕРТОР

Димитър Юдов, Емил Марев
Бургаски свободен университет

FREQUENCY REGULATION OF SERIAL INVERTER

Dimitar Yudov, Emil Marev
Burgas Free Universiti

Абстракт: В източниците за индукционно нагриване на флуиди популярен е последователния резонансен инвертор. За регулиране на температурата на инвертора се използва методът на честотно регулиране на изходната мощност. При този метод елементите, съставляващи резонансния кръг имат константни параметри. Променя се работната честота, при което се получава плавно регулиране на мощността на индукционния нагревател.

Ключови думи: регулиране, последователен резонанс, инвертор, нагриване на флуиди

Abstract: At sources of induction heating of fluids is the most popular serial resonant inverter. To regulate the temperature of the inverter use the method of frequency control of the output power. In this method, the elements composing the resonance circuit having constant parameters. Operating frequency is changed, to afford a smooth adjustment of the output power of the induction heater.

Keywords: serial resonant inverter, heating fluids, regulating

Въведение

Резонансните инвертори намират широко приложение в редица технологични устройства, свързани с преобразуване на електрическата енергия в топлина, чрез индукционно нагриване за:

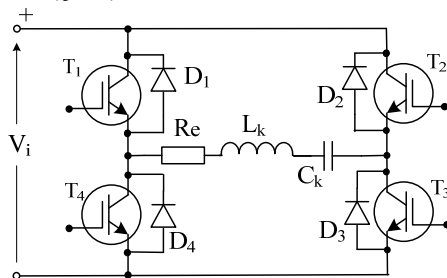
- топене и закаляване на метали;
- заваряване и рязане на метали;
- захранване на газоразрядни лампи;
- нагриване на домакински прибори (индукционни котлони);
- нагриване на флуиди и др.

Във всички описани случаи се налага регулирането на температурата, осветеността и други показатели на захранвания от инвертора обект. Този ефект в най-общия случай се получава чрез регулиране на режима на работа на резонансния инвертор. Резонансните инвертори, които се използват в цитираните приложения са:

- според вида на захранващия източник – с отворен или затворен вход (по напрежение или по ток);
- според типа на схемата – мостови, полумостови или със средна точка на трансформатора.

В статията е разгледан подробно резонансен мостови инвертор със захранващ източник на напрежение, като получените резултати с определен коефициент на приравняване са валидни за всички схеми на резонансни инвертори с отворен вход.

За детайлизиране на изследването е избран последователен резонансен инвертор за нагряване на вода (фиг.1).



Фиг. 1. Принципно схема на мостов резонансен инвертор

На схемата L_k и C_k са комутиращите реактивни елементи на резонансния кръг. Конструктивно бобината L_k е реализирана като индуктор за нагряване на вода. Резисторът R_e е еквивалентно активно съпротивление и отразява загубната мощност от токовете на Фуко, които нагряват вторичната намотка на индуктора и затоплят водата.

Целта на статията е да се анализира по-задълбочено честотен метод за регулиране на резонансния инвертор за получаване на възможност за регулиране на температурата на нагряваната вода в желани граници.

При нагряване на флуиди се изисква регулиране на изходната температура. По формула се получава необходимата изходна мощност на инвертора при определен дебит на водата [1].

$$(1) P_o = \Delta m \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) [kW]$$

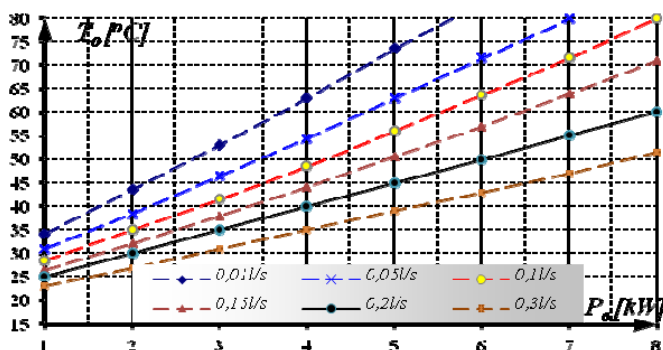
Където: Δm – дебит на водата l/s;

C_p – атмосферно налягане по линията на насищане kJ/kg.K;

T_o – изходна температура °C;

T_i – входна температура °C;

От (1) за различно приложения на нагряващия прибор (бойлер) са получени зависимости (фиг. 2).

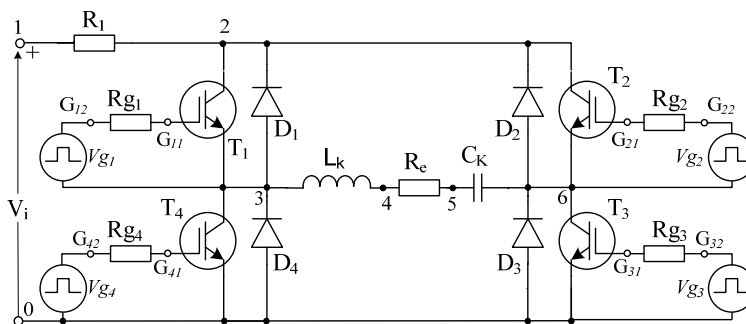


Фиг. 2. Диаграма на изх. температура T_o при промяна на изх. мощност за различни стойности дебит

Прието входната температура на водата при влизане в бойлера $T_i = 20^\circ\text{C}$.

От фиг. 2 се вижда, че като се осигури регулиране на изходната мощност на инвертора в границите от 2 до 6 kW, ще се регулира температурата в широки граници от 20°C до 60°C , достатъчни при използване на прибора за битов бойлер. Изследването е реализирано с Pspice симулация с реални модели на IGBT транзистори тип IXGH40N60A

Pspice моделът на схемата от фиг.1 е показан на фиг.3



Фиг. 3. Pspice модел на изследвания LC инвертор

За базови стойности на инвертора се приема $P_o = 6\text{kW}$ и $E = 300\text{V}$.

Стойностите на елементите на инвертора се получават от зависимостите:

$$U_m = \frac{4 \cdot V_i}{\pi}$$

- еквивалентно активно съпротивление

$$R_e = \frac{U^2}{P_o} = \frac{8.5^2}{\pi^2 \cdot 6000} = \frac{8.300^2}{\pi^2 \cdot 6000} = 9.8\Omega$$

- еквивалентен импеданс на колебателния кръг

$$Z_e = \frac{R_e}{Q} = \frac{9.8}{1.5} = 6.5\Omega$$

където Q – качествен фактор на колебателния кръг и се приема в границите 1,5 до 3. За високи захранващи напрежения се избира ниска стойност на Q.

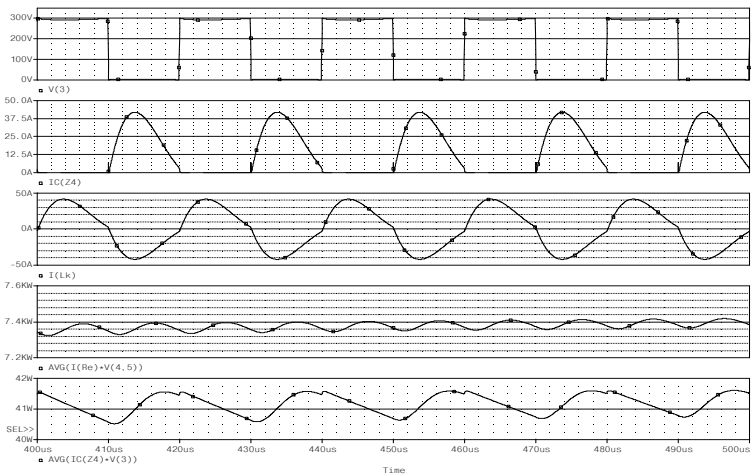
- стойност на комутиращата индуктивност

$$L_k = \frac{Z_e}{2 \cdot \pi \cdot f_s} = \frac{6.5}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^3} = 21\mu\text{H}$$

- стойност на комутирация кондензатор

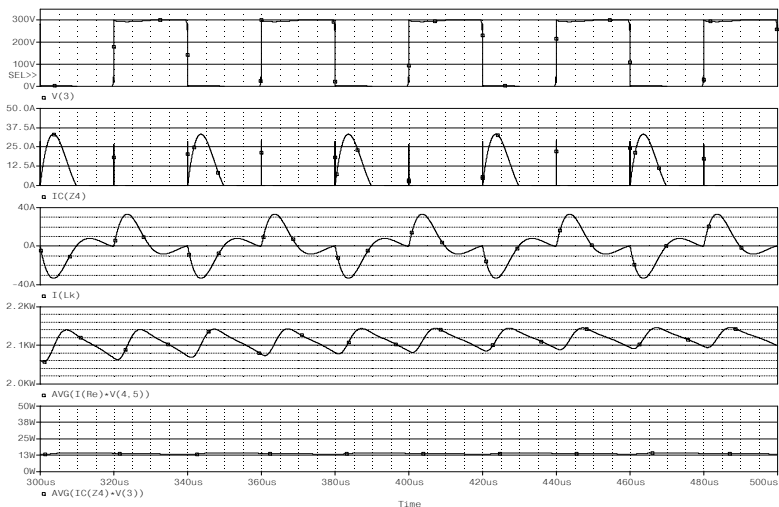
$$C_k = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_s)^2 \cdot L_k} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^3)^2 \cdot 21 \cdot 10^{-6}} = 0.36\mu\text{F}$$

За работоспособността на изследвания инвертор се съди по вида на времедиаграмите. На фиг. 4 са показани времедиаграмите на инвертора за номинален режим на работа, при който се получава максималната температура на водата. При този режим работната честота е $f_{sw} = 50\text{ kHz}$. Показани са: напрежението върху транзисторите – ($V(3)$), токът през транзисторите ($I_c(z_4)$), токът през индуктора (I_{Lk}), активната мощност, превърнала се в токове на Фуко ($\text{AVG}(I(R_e)) \cdot V(4,5)$) и загубната мощност върху транзисторите ($\text{AVG}(I_c(Z_4)) \cdot V(3)$).



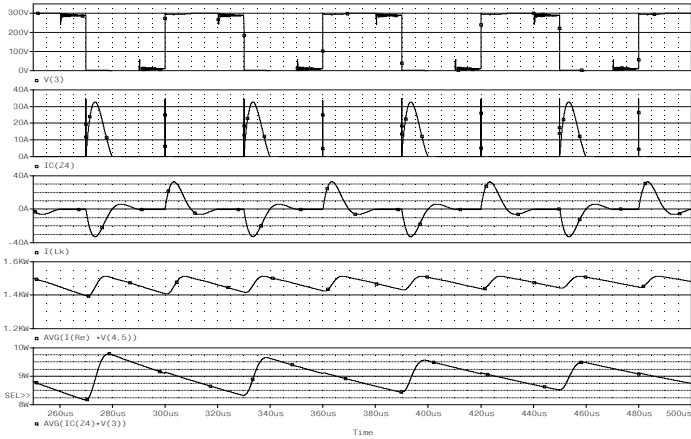
Фиг. 4. Времедиаграми на пада на напрежение върху транзистора, токовете през транзистора I_C и през индуктора I_L , мощността отдавана в товара P_o и загубната мощност P_z

На фиг. 5 са показани същите времедиаграми на инвертора за режим при дълбоко регулиране, което съответства на минимална температура на нагряване на вода. При този режим работната честота е $f_{sw}=25\text{ kHz}$



Фиг. 5. Времедиаграми на пада на напрежение върху транзистора, токовете през транзистора I_C и през индуктора I_L , мощността отдавана в товара P_o и загубната мощност P_z в режим на дълбоко регулиране

Получените времедиаграми показват запазване добра форма на напрежението и тока през транзисторите, близка до синусоида форма на тока в индуктора, достатъчна изходна мощност и минимални загуби в транзисторите (фиг. 4 - $T=20\mu s$). Тези показатели се запазват при дълбоко регулиране на изходната мощност (фиг.5- $T=40\mu s$).

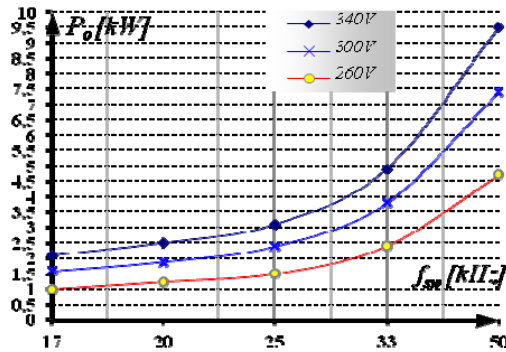


Фиг. 6. Времедиаграми на пада на напрежение върху транзистора, токовете през транзистора I_C и през индуктора I_L , мощността отдавана в товара P_o и загубната мощност P_z в режим на по-дълбоко регулиране

При още по-дълбоко регулиране на изходната мощност (фиг. 6- $T=60\mu s$), параметрите остават добри, като се забелязват преходни процеси в U_{ce} при включване и изключване на транзисторите.

По-задълбочени изводи за работата на схемата при плавно регулиране на изходната температура се получават при следните изследвания:

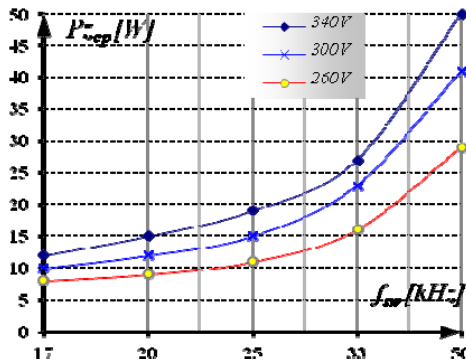
На фиг. 7 са показани зависимостите на средната изходна $P_{o,cp}$ мощност на изследвания резонансен инвертор с последователен трептящ кръг за товар при изменение на параметъра f_{sw} , за три стойности на захранващото напрежение – отговарящо на $\pm 15\%$ толеранс на захранващата мрежа.



Фиг. 7. Диаграма на средната стойност на изходната мощност P_o в индуктора

Мощността, отделена в товара има плавно изменящ характер при промяна на работната честота f_{sw} . При промяна на захранващото напрежение в рамките на $\pm 15\%$ графиките са успоредни, като нарастват при по-високите честоти. Това дава възможност за плавно регулиране при промяна на работната честота f_{sw} и се покрива толеранса на захранващото напрежение за постигане на желаната мощност.

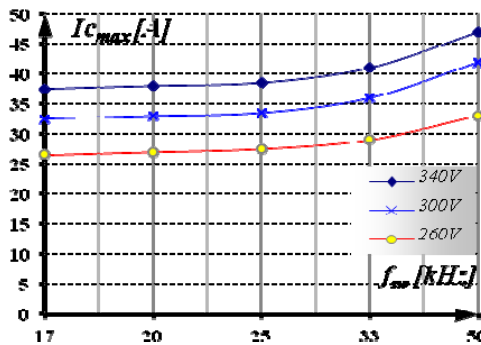
На фиг. 8 са показани зависимостите на средната загубна P_{zcp} мощност на изследвания резонансен инвертор с последователен трептящ кръг за товар при изменение на параметъра f_{sw} , за три стойности на захранващото напрежение – отговарящо на $\pm 15\%$ толеранс на захранващата мрежа.



Фиг. 8. Диаграма на средната стойност на загубната мощност P_{zcp} в индуктора

При средната загубна мощност в транзисторите се наблюдава плавно нарастване с линейно изменение за всяка стойност на захранващото напрежение. Това става в неголеми граници и е в допустимия диапазон за ефективна работа.

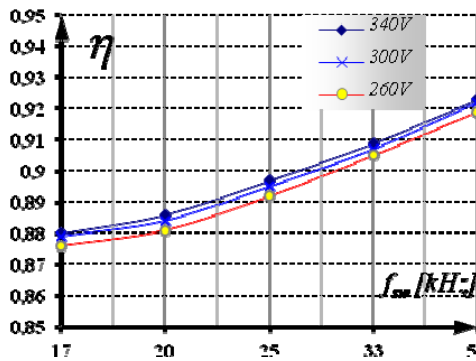
На фиг. 9 са показани зависимостите на тока през един от транзисторите на изследвания резонансен инвертор с последователен трептящ кръг за товар при изменение на параметъра f_{sw} , за три стойности на захранващото напрежение ($V_i=260V, 300V, 340V$).



Фиг. 9. Диаграма на максималния ток през транзисторите I_{cmax}

При диаграмата на максималния ток I_{ce} през всеки от транзисторите $T_1 \div T_4$ се наблюдава почти линейно изменение за всяка стойност на захранващото напрежение, като нараства при честоти надвишаващи 33MHz, дължащо се на промяна на стойността на качествения фактор Q на последователния трептящ кръг. Транзисторите работят при допустимия за тях максимален ток в импулсен режим.

На фиг.10 са показани зависимостите на коефициента на полезно действие η на изследвания резонансен инвертор с последователен трептящ кръг за товар при изменение на параметъра f_{sw} , за три стойности на захранващото напрежение ($V_i=260V, 300V, 340V$).



Фиг. 10. Диаграма на коефициента на полезно действие η

Коефициентът на полезно действие нараства почти линейно, като при нарастване на работната честота и при трите стойности на захранващото напрежение почти не се променя и е в областта около 0,9. Това свидетелства за стабилна и добра работа на резонансния инвертор в процеса на регулиране.

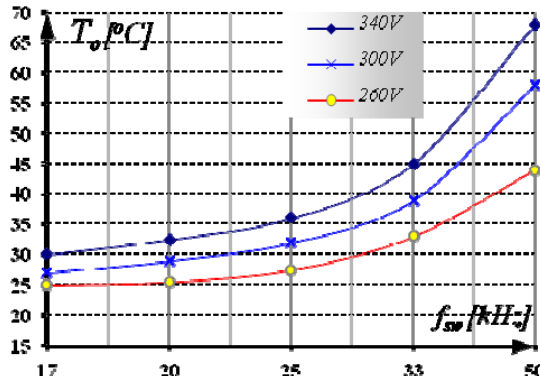
Тъй като основният параметър, който ни интересува, при системи за нагряване на вода е стойността на температурата до която се нагрява изходящата вода е желателно да се свърже работата на инвертора с този показател.

В табл. 1 е показано съответствието на изходната температура на водата от мощността на инвертора, при температура на входящата вода $T_i=20^\circ C$.

Таблица 1

T_{out}	$^\circ C$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
P_c	kW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

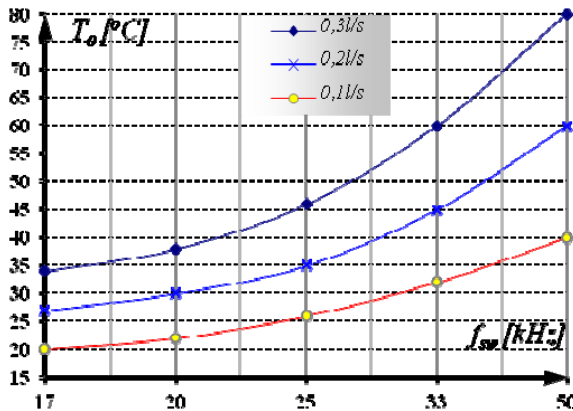
На фиг.11 са показани зависимостите на температурата на изходящия флуид, получени от изследвания резонансен инвертор с последователен трептящ кръг за товар при изменение на параметъра f_{sw} , за три стойности на захранващото напрежение ($V_i=260V, 300V, 340V$).



Фиг. 11. Диаграма на изходната температура T_o при промяна на раб. честота за три стойности на U_i

Мощността, отделена в товара има плавно променящ се характер при промяна на работната честота f_{sw} . При промяна на захранващото напрежение в рамките на $\pm 15\%$ графиките са успоредни. Това дава възможност за плавно регулиране при промяна на работната честота f_{sw} и се покрива толеранса на захранващото напрежение за постигане на желаната мощност.

На фиг.12 са показани зависимостите на температурата на изходящия флуид, получени от изследвания резонансен инвертор с последователен трептящ кръг за товар при изменение на параметъра f_{sw} , за три стойности на дебита на течащия флуид ($\Delta_m = 0,11/s, 0,21/s, 0,31/s$.)



Фиг. 12. Диаграма на изх. температура T_o при промяна на раб. честота за три стойности дебита Δ_m

Необходимата температура, отделена във флуида има плавно изменящ характер, при промяна на работната честота f_{sw} . При промяна на дебита на водата графиките вървят успоредно, като нарастват при по-високите честоти.

Изводи:

1. Последователният резонансен инвертор показва добри енергетически характеристики при използването му в системи за нагряване на флуиди.
2. Формите на тока и напрежението на транзисторите се запазва синусоидална при широки граници на регулиране.
3. Коефициентът на полезно действие се променя от 0,88 до 0,92 и удовлетворява изискванията за индукционно нагряване на флуиди.

Литература:

1. Марева Д., ЮдовД., Марев Е. „Автономен инвертор за индукционно нагряване на вода”, ВФУ 2010-1
2. Марева Д., ЮдовД., Марев Е. „Инвертор за индукционно нагряване на флуиди с подобрени енергийни показатели” – Трети международен научен конгрес „50 години ТУ- Варна”, 04-06 октомври 2012г., стр. 180
3. Sugimura H., Muraoka H., Nakaoka M. „Dual Mode Phase – Shifted ZVS – PWM Load Resonant High–Frequency Inverter for Induction Heating Super Heated Steamer” - Yamaguchi University, Yamaguchi, Japan, Engineering Journal, 3 July 2004

D. Mareva, D. Yudov and E. Marev is with the Department of CITN, Free University-Burgas, 62 San Stefano Blvd., 8000 Burgas, Bulgaria, e-mail: D_Mareva@ABV.bg; E_Marev@ABV.bg