РЕГУЛИРАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА ПРИ ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ВОДА

Даниела Марева, Димитър Юдов
Бургаски свободен университет

TEMPERATURE REGULATION IN INDUCTION HEATING OF WATER

Daniela Mareva, DimitarYudov
Burgas Free Universiti

Абстракт*: В източниците за индукционно нагряване на вода популярен е последователния резонансен инвертор. За регулиране на температурата на му се използва честотно регулиране или време-импулсно регулиране на изходната мощност. В статията е показана усъвършенствана схема на LLC резонансен инвертор с честотен метод на регулиране и получените резултати са сравнени при еднакви условия на работа с LC резонансен инвертор .*

Ключови думи*: регулиране, последователно-паралелен резонанс, инвертор,*

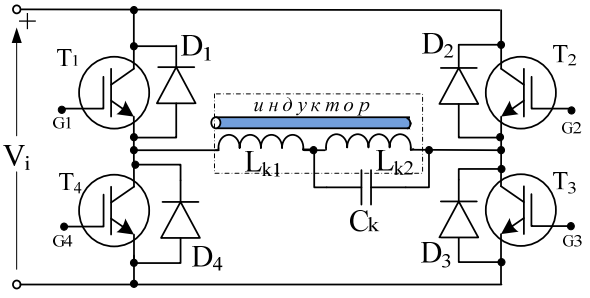
Abstract: *At sources of induction heating of water is the most popular serial resonant inverter. To regulate the temperature of the inverter**,** using frequency regulation or time-pulse regulation of output power. The article shows a improved scheme of LLC resonant inverter with frequency regulation method and the obtained results are compared with the same working conditions of the LC resonant inverter.*

Keywords*: serial-paralel resonant, inverter, heating of water, regulating*

Въведение

В [1] са показани резултати от изследването на последователен (LC) резонансен инвертор с отворен вход, който се използва за индукционно нагряване на вода. Търсенето на по-добро схемно решение на инвертор за индукционно нагряване на вода означава, да се получи инвертор с по-добри енергетични характеристики, което означава да има по добро кпд, по-малки загуби върху транзисторите, по-добро използване на транзисторите по ток и по напрежение.

В статията е разгледан подробно резонансен мостови инвертор със захранващ източник на напрежение и сложна конфигурация (LLC) на резонансния кръг (фиг.1). [2,3]



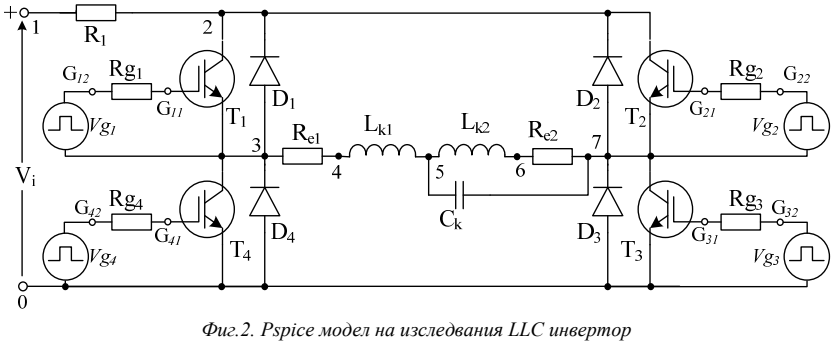
Фиг. 1. Схема на изследвания LLC инвертор

На схемата L_{k1},L_{k2} и C_k са комутиращите реактивни елементи на резонансния кръг. Конструктивно бобините L_{k1},L_{k2} са реализирани като индуктор за нагряване на вода.

Целта на статията е да се анализират енергетичните характеристики при по-задълбочено изследване на предложената схема, при честотен метод за регулиране и се направи съпоставка със схемата на последователен резонансен инвертор със същите енергетични показатели[1].

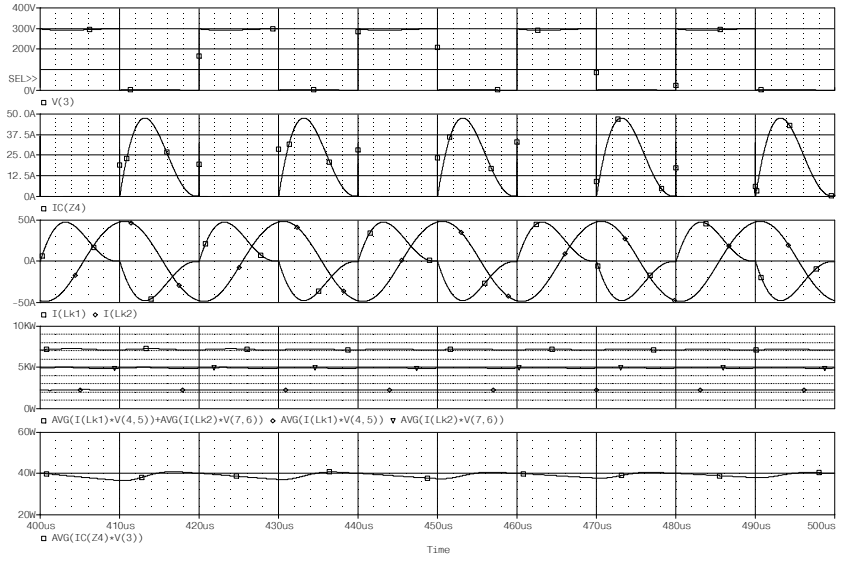
В [1] е дадена формулата и зависимостта, която показва връзката между дебита на нагряваната течност, получената температура на изхода на индуктора и необходимата изходна мощност на инвертора. За изследването се приема входна температура на водата при влизане в бойлера $T_i = 20^oC$ и регулиране на изходната мощност на инвертора в границите от 2 до 6 kW, което ще осигури изменение на температурата в границите ($30^oC \div 60^oC$).

Pspice моделът на схемата от фиг. 1 е показан на фиг. 2 и симулацията е направена с реални модели на IGBT транзистори тип IXGH40N60A



Фиг.2. Pspice модел на изследвания LLC инвертор

Резисторите R_{e1} и R_{e2} са еквивалентни активни съпротивления и отразяват загубната мощност от токовете на Фуко, които нагряват и затоплят водата.



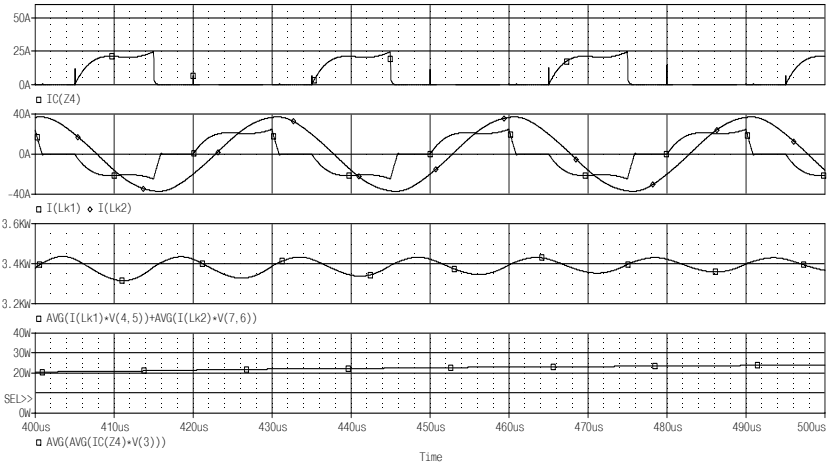
Фиг. 3. Времедиаграми на: напрежение върху транзистора – (V(3)), ток през транзистора (Ic(z_4)), ток през индукторите(I_{Lk1}, I_{Lk2}), мощността отдавана в товара P_o и загубната мощност P_z в номинален режим на работа

За работоспособността на изследвания LLC инвертор се съди по вида на времедиаграмите. На фиг.3 са показани времедиаграмите на инвертора за номинален режим на работа (50kHz), при който се получава максималната температура на водата. Показани са: напрежението върху транзисторите – (V(3)), токът през транзисторите (Ic($z_1 \div z_4$)), токът през индукторите (I_{Lk1}, I_{Lk2}), активната мощност, създадена от токове на Фуко AVG(I(L_{k1})*V(4,5))+AVG(I(L_{k2})*V(7,6)) и загубната мощност в транзисторите (AVG(I_C(Z_4)*V(3))).

От времедиаграмите се вижда:

1. Напрежението върху транзистора е с правоъгълна форма и не надвишава захранващото напрежени, което определя максимален коефициент на използване на транзисторите по напрежение (k_u= 1).
2. Формата на тока в транзисторите е близка до синусоидалната.
3. Формата на тока през първия индуктор е близка до синусоидална, а през втория индуктор токът е синусоидален.
4. Изходната мощност удовлетворява заданието, като в първия индуктор мощността е два пъти по-малка от тази във втория индуктор.
5. Загубната мощност в транзисторите е малка.

На фиг. 4 са показани същите времедиаграми на инвертора за режим при дълбоко регулиране, което съответства на минимална температура на нагряване на вода (при f_{sw}=33kHz).



Фиг. 4. Времедиаграми на: ток през транзистора (Ic(z4)), ток през индукторите (I_{Lk1}, I_{Lk2}), мощността отдавана в товара P_o и загубната мощност P_z в режим на дълбоко регулиране

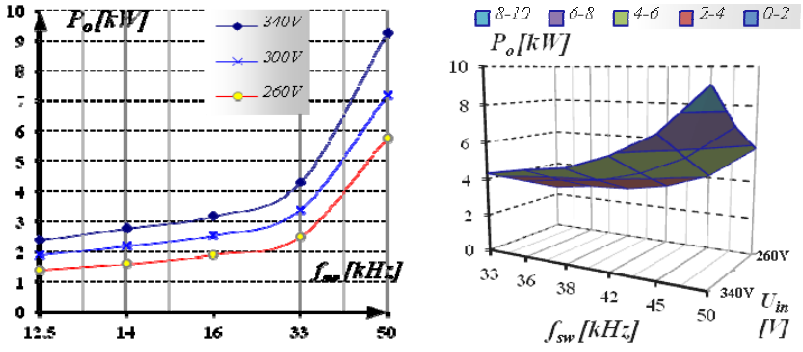
От получените времедиаграми се вижда, че при номинален режим формата на токовете и напреженията в двата индуктора е близка до синусоида, като се достига достатъчна изходна мощност и минимални загуби в транзисторите (фиг. 3). Тези показатели не се запазват при дълбоко регулиране на изходната мощност (фиг. 4). Наблюдава се нарушаване на синусоидалната форма на тока през транзисторите и ненулево изключване. Токът през индуктора I_{Lk2} на паралелния кръг, запазва синусоидална форма. Токът I_{Lk1} през другата част на индуктора L_{k1} образуващ последователния трептящ кръг е с прекъснат характер и форма, еднаква на тока през транзистора.

Въпреки недобрия режим на работа на инвертора се постига необходимото регулиране на мощността и се запазват малки загуби в транзисторите.

По-задълбочени изводи за работата на схемата при честотно регулиране на изходната мощност се получава при следните изследвания:

На фиг.5 са показани: зависимостта на средната стойност на изходната мощност (Po_{cp}) и средната загубна мощност (Pz_{cp}) на изследвания LLC резонансен инвертор с последователно-паралелен трептящ кръг за товар при изменение на работната честота f_{sw} от 12,5 kHz до 50kHz, за три стойности на захранващото напрежение (260V, 300V и 340V) - отговарящо на ±10% толеранс на захранващата мрежа.

На фиг.5б е представена пространствена диаграма на средната изходна мощност Po_{cp} , но само в честотния обхват 33÷50kHz, тъй като в температурно отношение тук най-много се използва инвертора за нагряване на битов бойлер.

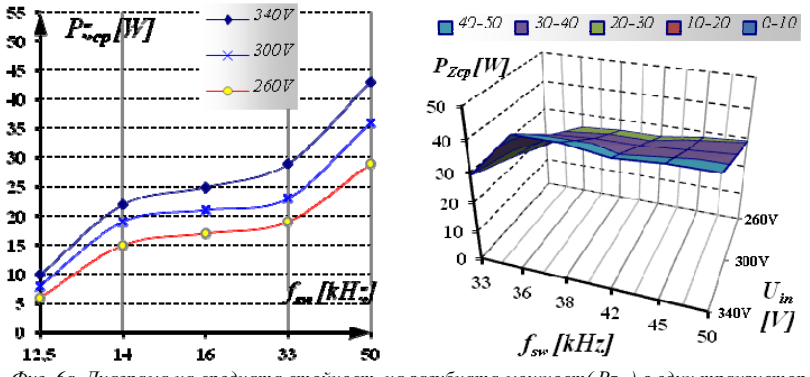


Фиг. 5а. Диаграма на средната стойност на изходната мощност P_o в индуктора при промяна на работната честота за три стойности на захр. напрежение V_i и фиг.5б - пространствена диаграма на P_o в диапазона 33÷50kHz

Мощността, отделена в товара има плавно изменящ характер при промяна на работната честота f_{sw} до около 33kHz. В честотния диапазон от 33kHz до 50kHz мощността нараства с по-голяма стръмност. При промяна на захранващото напрежение в рамките на ±10% графиките вървят успоредно, като нарастват към високите честоти. Това дава възможност за плавно регулиране при промяна на работната честота f_{sw} и така се компенсират промените на захранващото напрежение за постигане на желаната мощност, респективно желаната температура на нагряване на водата [1].

Тази графична зависимост е аналогична на характеристиката на последователния инвертор [1-фиг.7].

На фиг.6 са показани зависимостта на средната загубна мощност (Pz_{cp}) на изследвания LLC резонансен инвертор с последователно-паралелен трептящ кръг за товар при изменение на работната честота f_{sw} от 12,5 kHz до 50kHz, за три стойности на захранващото напрежение (260V, 300V и 340V) – отговарящо на ±10% толеранс на захранващата мрежа. На фиг.6б е представена пространствена диаграма на средната загубна мощност (Pz_{cp}) в честотния обхват 33÷50kHz.

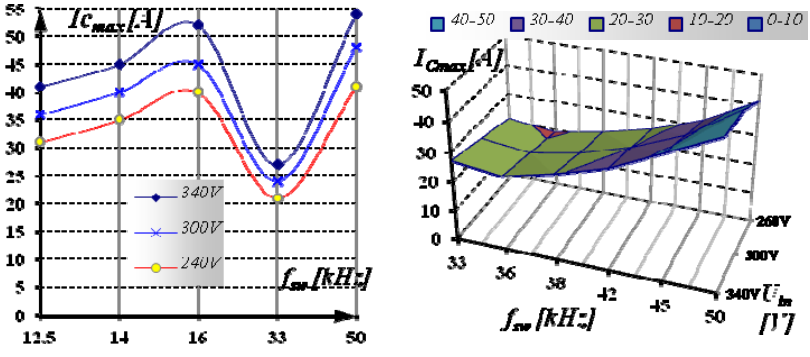


Фиг. 6а. Диаграма на средната стойност на загубната мощност(Pz_{cp}) в един транзистор при промяна на работната честота за три стойности на захр. напрежение Vi и фиг.6б пространствена диаграма на Pz_{cp} в диапазона 33÷50kHz

При средната загубна мощност се наблюдава нарастване на загубите върху транзистора с нарастване на честотата. Графиката няма линейно нарастване, като за средата на работния честотен обхват нарастването е минимално. При трите стойности на захранващото напрежение диаграмите са почти успоредни. Загубите са в неголеми граници и нарастват повече след 33kHz. Те са приемливи за вида инвертор и необходимата мощност и в сравнение с последователния резонансен инвертор [1-фиг.8] имат малко по-малка стойност.

На фиг. 7 са показани зависимостите на тока през един от транзисторите на изследвания LLC резонансен инвертор с последователно-паралелен трептящ кръг за товар при изменение на работната честота f_{sw}, при трите стойности на захранващото напрежение.

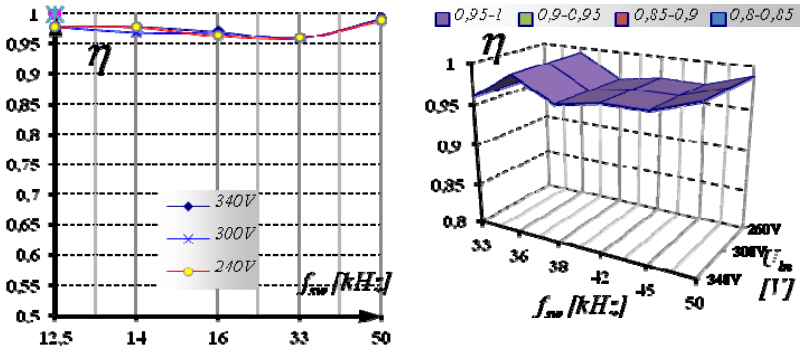
На фиг. 7б е представена пространствена диаграма на тока през един от транзисторите в честотния обхват 33÷50kHz.



Фиг. 7а. Диаграма на максималния ток през транзисторите Ic_{max} при промяна на работната честота за три стойности на захр. напрежение V_i и фиг. 7б пространствена диаграма на Ic_{max} в диапазона 33÷50kHz

При диаграмата на максималния ток I_{ce} през всеки от транзисторите $T_1 \div T_4$ се наблюдават два екстримума на тока – максимален – при 16kHz и минимален – при 33kHz. След 33kHz токът в транзисторите линейно нараства. Въпреки този вид на характеристиката транзисторите работят при допустимия за тях максимален ток в импулсен режим. В областта на 33kHz, при минималния екстремум токът в транзисторите е по-малък от аналогичната зависимост на последователния инвертор [1-фиг.9]

На фиг. 8 са показани зависимостите на коефициентът на полезно действие η на изследвания LLC резонансен инвертор с последователно-паралелен трептящ кръг за товар при изменение на работната честота f_{sw}, при трите стойности на захранващото напрежение. На фиг. 8б е представена пространствена диаграма на коефициентът на полезно действие η в честотния обхват 33÷50kHz.



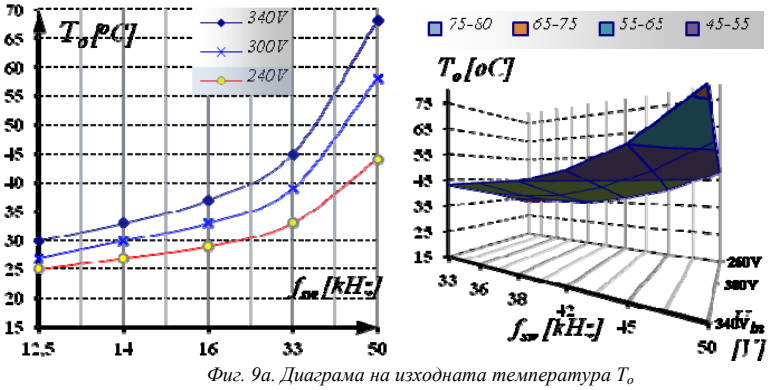
Фиг. 8а. Диаграма на коефициента на полезно действие η при промяна на работната честота за три стойности на захр. напрежение U_I и фиг. 8б пространствена диаграма на η в диапазона 33÷50kHz

Коефициентът на полезно действие е с почти линеен характер при изменение на работната честота в областта над 0,95. И при трите стойности на захранващото напрежение почти се припокриват. Това свидетелства за добра и стабилна работа на LLC резонансния инвертор през процеса на регулиране, въпреки сложния характер на трептящия кръг-товар и е по-голямо от аналогичната зависимост на последователния инвертор [1-фиг.10]

На фиг. 9 са показани зависимостите на температурата на изходящата вода, получени от изследвания LLC резонансен инвертор, при изменение на работната честота f_{sw}, за три стойности на захранващото напрежение. На фиг. 9б е представена пространствена диаграма на температурата на изходящата вода в честотния обхват 33÷50kHz.

Зависимостта на изходната температура на водата от мощността на инвертора е дадена в [1] и при изменение на температурата от 30°C до 80°C се променя мощността от 1 до 10kW.

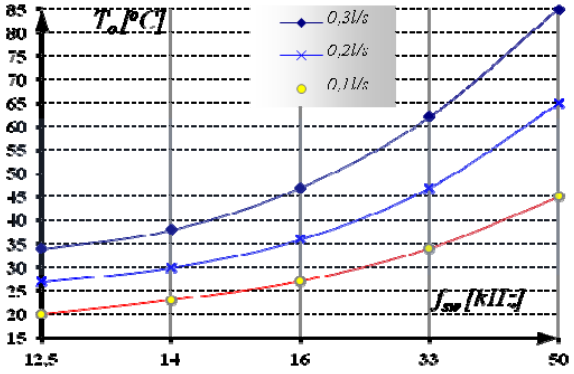
Всички досегашни изследвания са реализирани при една стойност на дебита Δ_m на течащата вода (Δ_m =0.2l/s)



Фиг. 9а. Диаграма на изходната температура T_o при промяна на работната честота за три стойности на захр. напрежение V_I и фиг. 9б – пространствена диаграма на T_o в диапазона 33÷50kHz

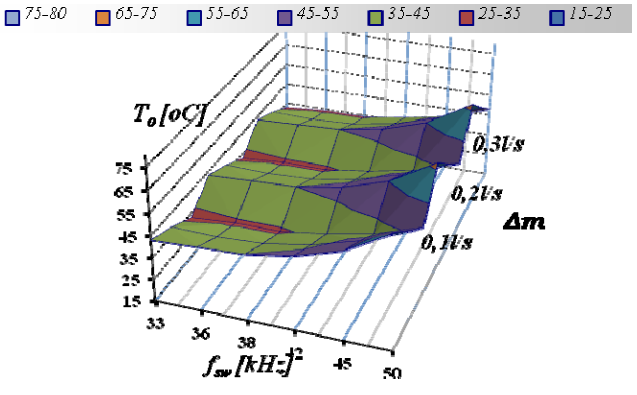
Изменението на температурата има нелинеен характер с по-стръмно изменение при честоти над 33kHz. В реалния работен диапазон от 33kHz до 50kHz изменението е линейно (фиг.8б). Получената зависимост на $T_o=F(f)$ при V_i=const.

На фиг.10 са показани зависимостите на температурата на изходящата вода , получени от изследвания LLC резонансен инвертор, при изменение на работната честота f_{sw}, за три стойности на дебита на течащата вода Δ_m. На фиг.10б е представена пространствена диаграма на температурата на изходящата вода в честотния обхват 33÷50kHz.



Фиг.10а. Диаграма на изходната температура T_o при промяна на работната честота за три стойности на дебита Δ_m

Необходимата температура, отделена във водата 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. В реалния работен диапазон от 33kHz до 50kHz изменението е линейно (фиг.10б). Това дава възможност за точно и плавно регулиране на желаната температура. В сравнение с [1] тук се получа-ват малко по-високи температури на течащата вода при еднакви други условия.



Фиг. 10.б пространствена диаграма на T_o в диапазона 33÷50kHz при промяна на работната честота за три стойности на дебита Δ_m

Изводи:

1. Последователно-паралелният резонансен инвертор е работоспособен в широк диапазон на изменение на изходната температура T_o (15 $^oC \div 80^oC$), а за работния участък на битовия бойлер (40 $^oC \div 60^oC$) изменението на мощността P има линеен характер.
2. В сравнение с последователния резонансен инвертор разглежданата схема има следните преимущества:
   - има по-малки загуби върху транзисторите в целия диапазон на изменение на мощността;
   - има по-висок коефициент на полезно действие.

Недостатък на предложената схема е, че формата на тока през транзисторите в режим на дълбоко регулиране не е синусоидална. Това води до получаване на нелинейна характеристика на изменение на тези токове в диапазона на регулиране, дължащо се на сложната конфигурация на резонансния LLCкръг.

Литература:

1. Юдов Д., Марев Е. „Честотно регулиране на последователен инвертор“, BFU 2015-1
2. Марева Д., ЮдовД., Марев Е. „Автономен инвертор за индукционно нагряване на вода”, BFU 2010-1
3. 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
4. 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