

Разпределителни трансформатори за фотоволтаични електроцентрали с намотка ниско напрежение двоен зиг-заг

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Виктор Захариев, Цветомир Стоянов

В настоящата статия се разглежда метод за намаляване на пети, седми и единадесети хармоници на тока разпространяващи се в електроснабдителната мрежа, генерирани от инверторите на фотоволтаичните централи. Предлага се, повишаващия трансформатор, който работи съвместно с инверторите, да е с две намотки ниско напрежение, свързани в зиг-заг и намотка високо напрежение, свързана в триъгълник. Намотките ниско напрежение са съставени от бобини с различен брой навивки. Изчислен е оптималният ъгъл на дефазирание на електродвижещите напрежения индуктирани в двете намотки свързани в зиг-заг, при който има максимално намаляване на висшите хармоници..

Ключови думи: хармоници, разпределителен трансформатор.

Distributive transformer for use in photovoltaic electrical power plants with low voltage windings placed in zig-zag pattern

Radoslav Spasov, Victor Zahariev, Tsvetomir Stoyanov

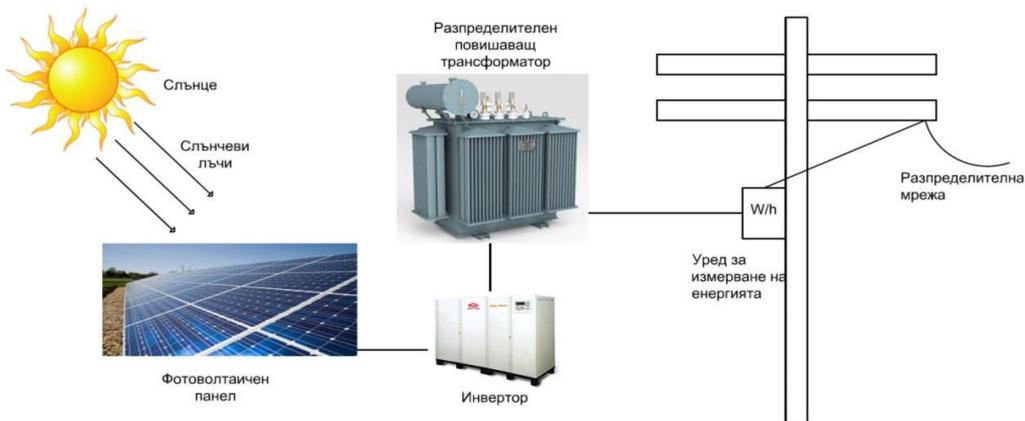
This article is a basic comparison and analysis of the difference in the harmonic output and the total harmonic distortion (THD) when the design and phase arrangement of the low voltage windings of a transformer as the transformer is supplied with different compilations of harmonic inputs taken from the standard. Calculating the optimal angle of phase shift between the windings present in the zig-zag.

Keywords: harmonics, total harmonics distortion, THD, transformer, distributive transformer.

1. Въведение

Разгледан е разпределителен трансформатор за работа в фотоволтаични електроцентрали. Специфичните изисквания към тези трансформатори са свързани със съвместната им работа с инвертори, които в зависимост от техните качества генерират напрежение с различен хармоничен състав. Наличието на хармоници в захранващото напрежение (респективно в токовете) води до увеличаване на загубите в трансформатора, а от друга страна хармониците в изходното напрежение на трансформатора влошават качествените характеристики на подаваната електроенергия към разпределителната мрежа.

Трансформаторът посредством намотките си високо напрежение е свързан към енергийната разпределителната мрежа, а първичната намотка е захранена с напрежение генерирано от инверторна група, която от своя страна е захранена от преобразователните панели на фотоволтаична електроцентрала. Цялостната принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор е показана на фиг. 1.

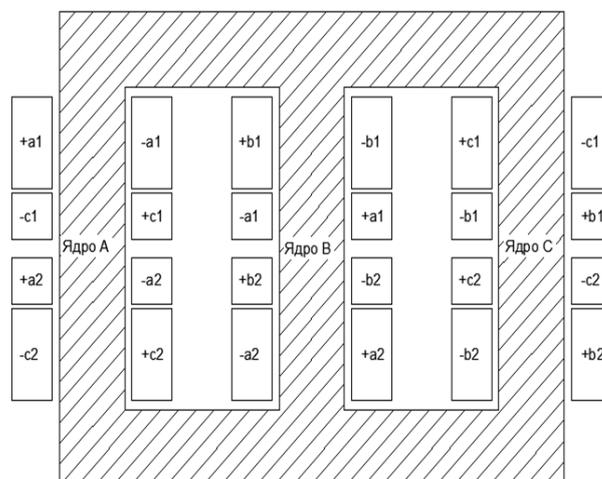


Фиг. 1 Принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор

2. Трансформатор с две намотки свързани в зиг-заг.

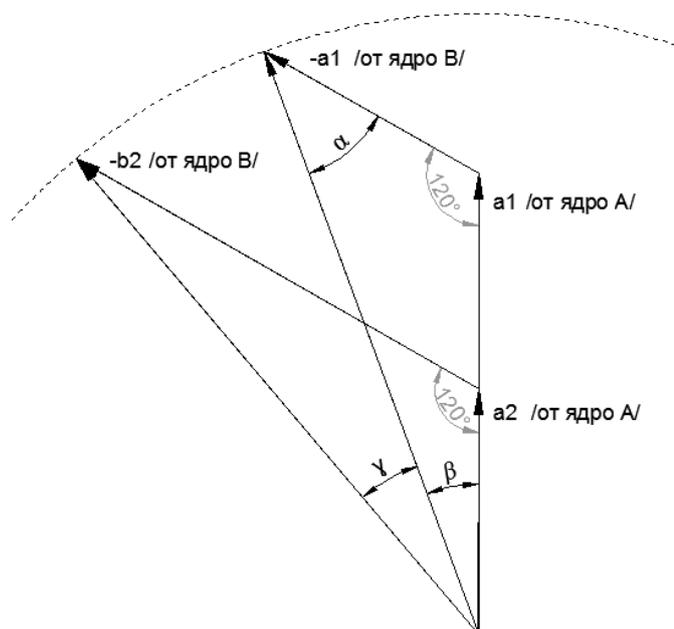
Предмет на изследване е конструкцията и схемата на свързване на намотките на разпределителен трансформатор, която би подобрила качеството на изходното напрежение.

В настоящата статия е представен трансформатор с две независими намотки ниско напрежение, свързани в схема зиг-заг. Главната особеност на изследваните намотки е, че броя на навивките на бобините, които формират една фаза не са еднакви. По този начин се осигурява дефазирание на индуцираните е.д.н. в двете намотки на произволен ъгъл (при захранване на първичната намотка от мрежата) или създаване на общо м.в.н. от двете намотки ниско напрежение, като тока в тях е на произволен ъгъл (при захранване от два инвертора). Принципната схема на свързване на намотките ниско напрежение е показана на фиг.2.



Фиг. 2 Разпределение на фазите в намотките ниско напрежение за всяко ядро.

За определяне на броя на навивки за бобините ниско напрежение се изхожда от векторната диаграма показана на фиг. 3.



Фиг. 3 Векторна диаграма на индуктираните напрежения във фаза L1-1 и дефазирана фаза L1-2.

От векторната диаграма могат да се изведат следните зависимости:

$$\alpha + \beta = 60 \quad (1)$$

$$\gamma + 2\beta = 60 \quad (2)$$

където: γ е ъгъла на дефазиране; α и β са ъгли.

Следователно за зависимостите на ъглите в двата триъгълника от зададеният ъгъл на дефазиране са :

$$\alpha = 60 - \beta \quad (3)$$

и

$$\beta = \frac{(60 - \gamma)}{2} \quad (4)$$

За изследване на хармоничният състав на резултатното м.в.н. създадени от двете независими намотки ниско напрежение се използва следният алгоритъм:

1.Изчисляват се моментните стойности на токовете в двете намотки ниско напрежение в относителни единици, като големините на отделните амплитуди на хармониците са взети от таб.1. Таблица 1 е от стандарт IEEE 519-1992 (“Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”).

THD	0.136	0.194	0.241	0.281	0.35	0.413	0.443	0.472	0.501	0.529	0.585	0.641	0.727
K-factor UL	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	15	17	20
Over Rating	1.02	1.04	1.06	1.08	1.12	1.15	1.17	1.19	1.2	1.22	1.25	1.28	1.33
I1	0.991	0.982	0.972	0.963	0.944	0.924	0.914	0.904	0.894	0.884	0.863	0.842	0.809
I3	0.097	0.137	0.168	0.252	0.238	0.275	0.291	0.307	0.322	0.336	0.363	0.388	0.423
I5	0.058	0.082	0.101	0.117	0.143	0.165	0.175	0.184	0.193	0.202	0.218	0.233	0.254
I7	0.042	0.059	0.072	0.083	0.102	0.118	0.125	0.132	0.138	0.114	0.156	0.166	0.181
I9	0.032	0.046	0.056	0.065	0.079	0.092	0.097	0.102	0.107	0.112	0.121	0.129	0.141
I11	0.026	0.037	0.046	0.053	0.065	0.075	0.079	0.084	0.088	0.092	0.099	0.106	0.115
I13	0.022	0.032	0.039	0.045	0.055	0.063	0.067	0.071	0.074	0.078	0.084	0.09	0.098
I15	0.019	0.027	0.034	0.039	0.048	0.055	0.058	0.061	0.064	0.067	0.073	0.078	0.085
I17	0.017	0.024	0.03	0.034	0.042	0.048	0.051	0.054	0.057	0.059	0.064	0.069	0.075
I19	0.015	0.022	0.027	0.031	0.038	0.043	0.046	0.048	0.051	0.053	0.057	0.061	0.067
I21	0.014	0.02	0.024	0.028	0.034	0.039	0.042	0.044	0.046	0.048	0.052	0.055	0.06
I23	0.013	0.018	0.022	0.025	0.031	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.047	0.051	0.055
I25	0.012	0.016	0.02	0.023	0.029	0.33	0.035	0.037	0.039	0.04	0.044	0.047	0.051

Таблица 1. Таблица на стойностите на хармоничните изкривявания и амплитуди спрямо основния хармоник, К-фактор и THD

В таблицата от стандарта са зададени определени стойности на THD при различните к-фактори. Тоталното хармонично изкривяване за тока се изчислява по следната формула:

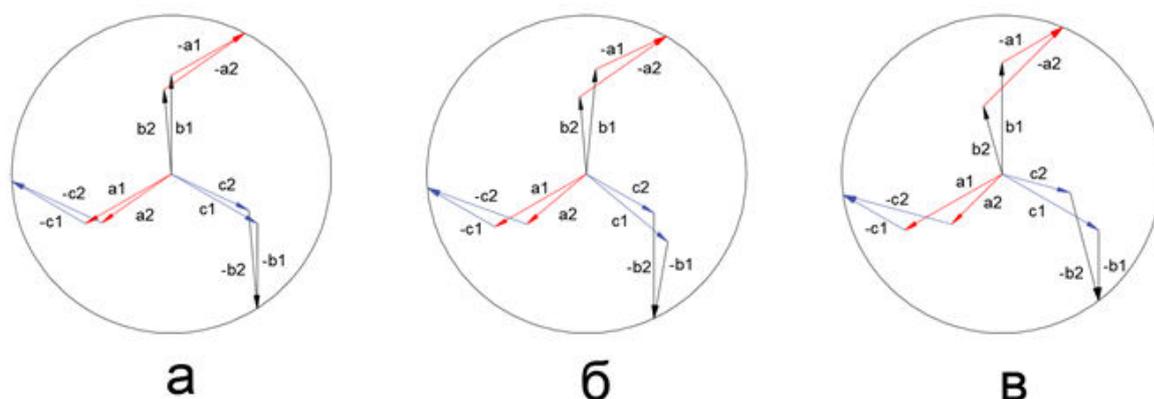
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (5)$$

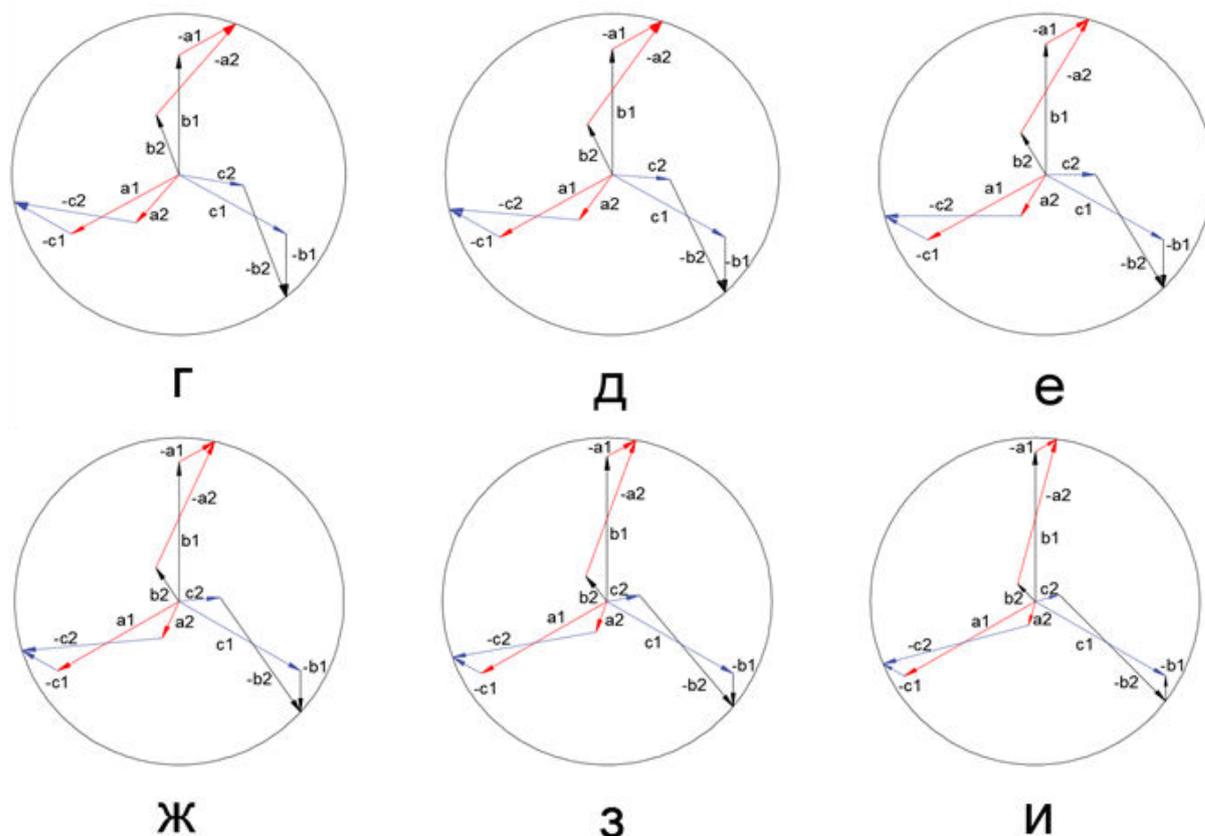
където: I_1 е основният хармоник или първи; THD е тоталното хармонично изкривяване; n е номер на хармоника.

2. Сумират се м.в.н. от всички бобини обхващащи ядро А. Прави се Фурие анализ на резултантното м.в.н. и се съпоставя хармоничния състав спрямо този ако намотката ниско напрежение е например двуслойна цилиндрична.

3. Процедурата се повтаря за различни к-фактори / от 2 до 7/ и при различни ъгли на дефазирание на токовете в двете намотки ниско напрежение.

На фиг.4 са показани векторните диаграми на м.в.н създадени от намотките ниско напрежение при различен ъгъл на дефазирание на токовете.

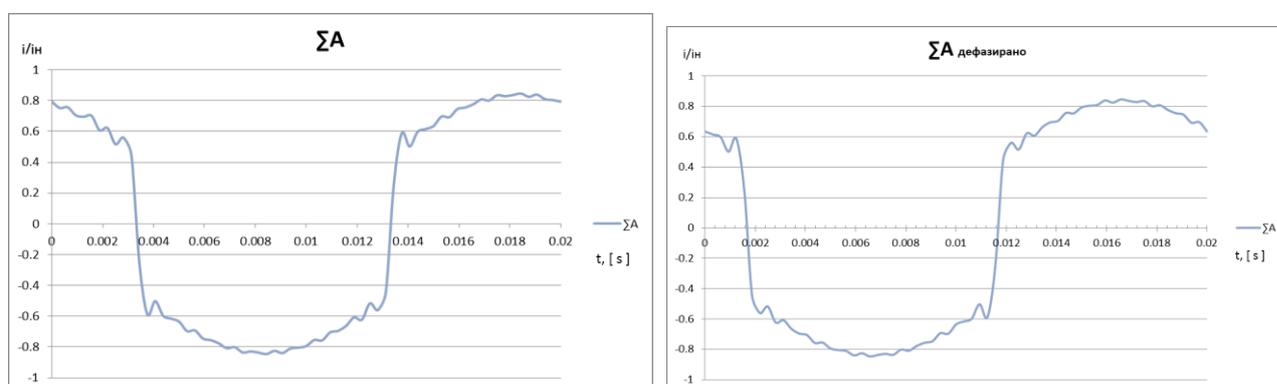




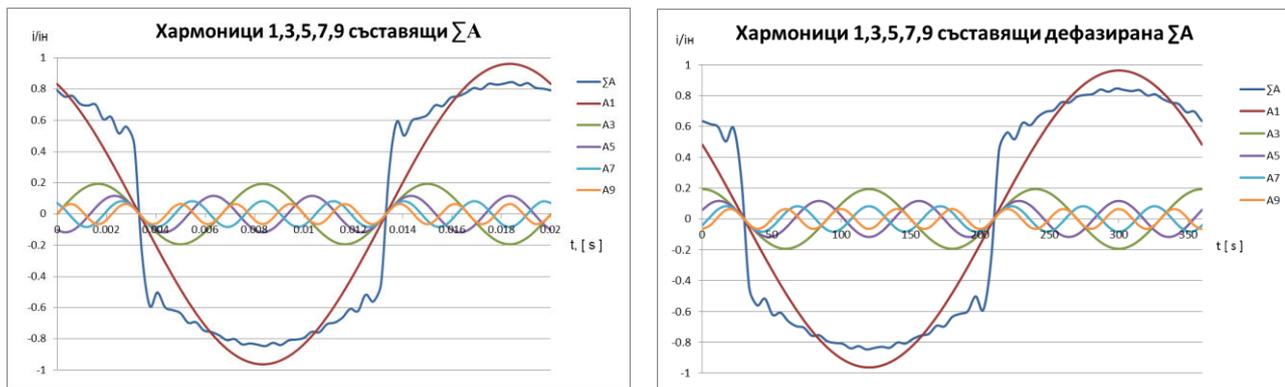
Фиг. 4 Векторни диаграми при дефазирание на:
 $a = 5$ [deg], $\bar{b} = 10$ [deg], $\bar{в} = 15$ [deg], $\bar{\Gamma} = 20$ [deg], $\bar{д} = 25$ [deg],
 $\bar{е} = 30$ [deg], $\bar{ж} = 35$ [deg], $\bar{з} = 40$ [deg], $\bar{и} = 45$ [deg].

3. Резултати от направените изчисления и симулации

Направени са симулации на работата на разпределителен трансформатор при захранване със симетрична система токове с к-фактор от 2 до 7. Моментните стойности на токовете са показани на фиг.5, а хармоничния състав е показан на фиг. 6.



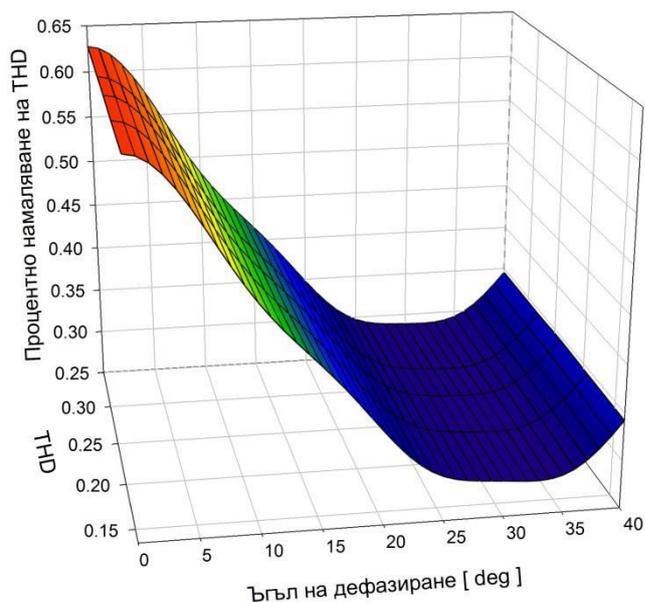
Фиг.5. Тока в относителни единици за фаза А и дефазираната фаза А - съставени за к-фактор 5 с пълен хармоничен състав (до 25 хармоник)



Фиг.6. Хармоничен състав на тока за фаза А и дефазирана фаза А съставена за к-фактор 5.

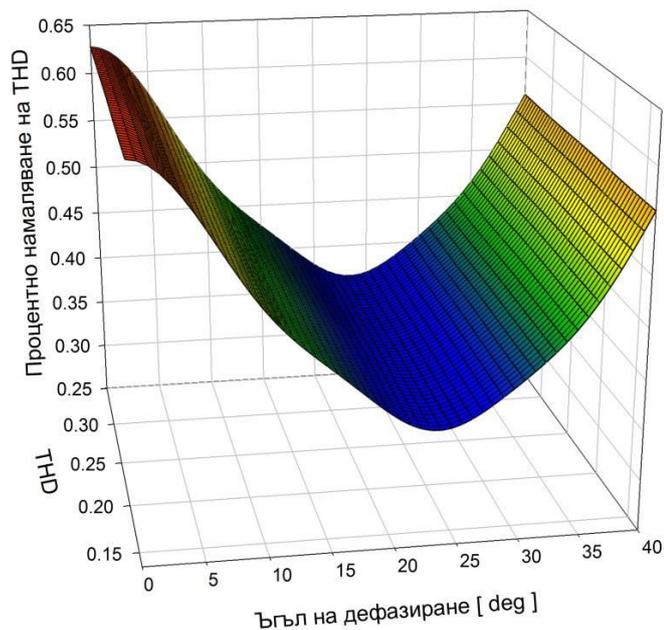
Всички резултати от изчисленията са представени на следващите фигури. Те показват процентното намаляване на THD на м.в.н. при трансформатор с две намотки зиг-заг, спрямо такъв с една намотка ниско напрежение.

Процентно намаляване на THD.
При К - фактор от 2 до 7, при свързване триъгълник - двоен зиг-заг.



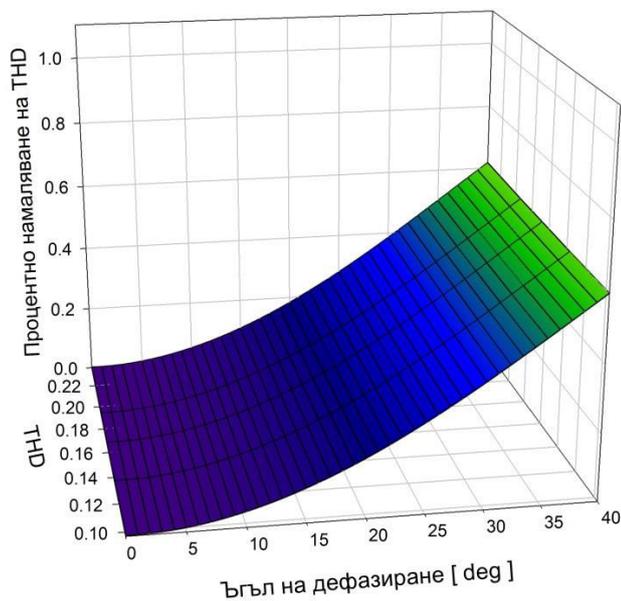
Фиг.7. Процентно намаляване на THD, при К- фактор от 2 до 7 при свързване триъгълник - двоен зиг-заг (без кратните на 3 хармоници).

Процентно намаляване на THD.
При к-фактор от 2 до 7, при свързване звезда-двоен зиг-заг



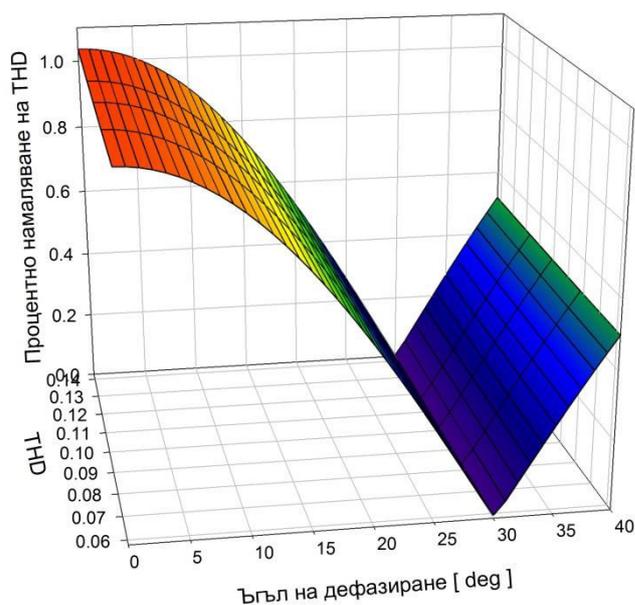
Фиг.8. Процентно намаляване на THD, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг (със кратните на 3 хармоници).

Процентно намаляване на THD за 3-и хармоник.
При к-фактор от 2 до 7, при свързване звезда-двоен зиг-заг



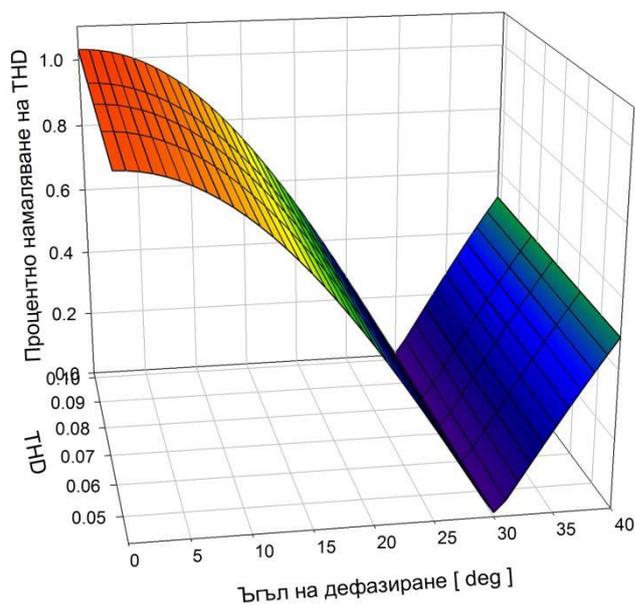
Фиг.9. Процентно намаляване на THD за 3-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.

Процентно намаляване на THD за 5-и хармоник.
При к-фактор от 2 до 7, при свързване звезда-двоен зиг-заг



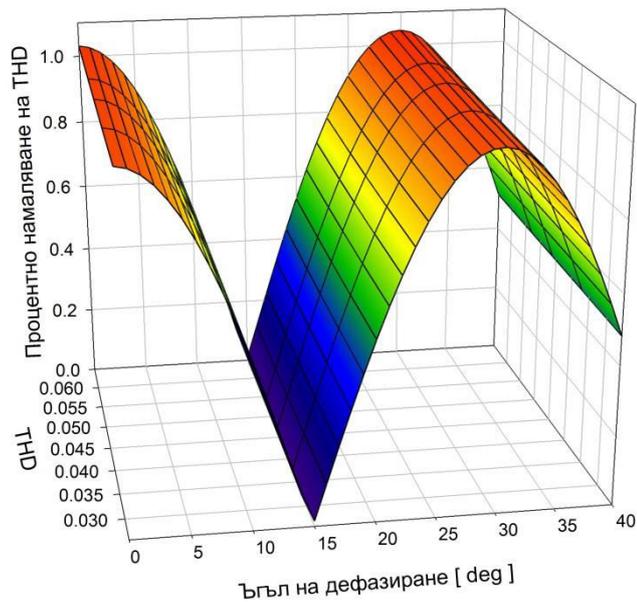
Фиг.10. Процентно намаляване на THD за 5-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.

Процентно намаляване на THD за 7-и хармоник.
При к-фактор от 2 до 7, при свързване звезда-двоен зиг-заг



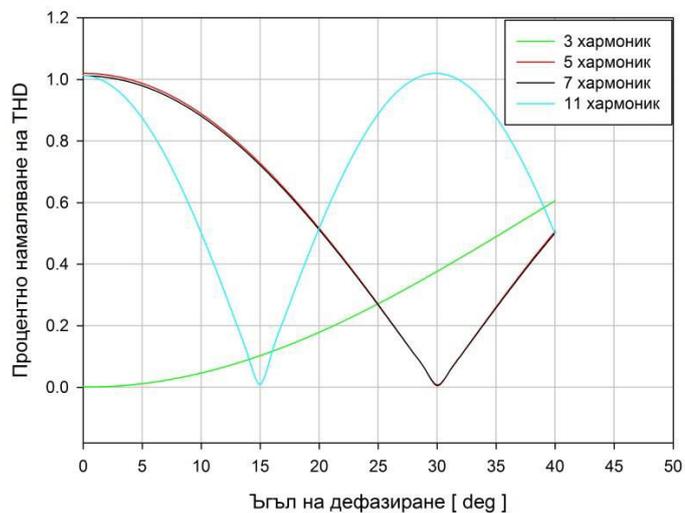
Фиг.11. Процентно намаляване на THD за 7-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.

Процентно намаляване на THD за 11-и хармоник.
При к-фактор от 2 до 7, при свързване звезда-двоен зиг-заг



Фиг.12. Процентно намаляване на THD за 11-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.

Процентно намаляване на THD за 3,5,7 и 11 хармоник
при К - фактор 4.



Фиг.13. Процентно намаляване на THD за 3, 5, 7 и 11-и хармоник, при К- фактор 4 при свързване звезда-двоен зиг-заг.

4. Заключение

1. От резултатите на направените изследвания може да се направи извода, че намотката високо напрежение трябва да е свързана в схема

триъгълник, за да се ограничат третите и кратните на три хармоници, тъй като подходящият ъгъл на дефазирание на токовете в двете намотки зиг-заг за максимално намаляване на 5 и 7 хармоници не ограничава третите.

2. При анализа на резултатите от фиг. 7 може да се препоръча дефазирание на токовете между двете намотки ниско напрежение от 30 градуса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] “Harmonics, Transformers and K-Factors”, CDA Publication 144, September 2000
- [2] Hemchandra Madhusudan Shertukde, “Distributed Photovoltaic Grid Transformers”
- [3] Стандарт БДС EN 50160
- [4] Стандарт IEEE 519-92
- [5] Разпределителни трансформатори за фотоволтаични електроцентрали“, годишник на Технически Университет - София, т. 66, книга 1, 2016, страница 137, ISSN 1311-0829

Автори: доц. д-р Радослав Лазаров Спасов, ТУ–София, катедра „Електрически машини“, тел. +359 2 965-2151, e-mail: lrs@tu-sofia.bg;

доц. д-р Пламон Миланов Ризов, ТУ–София, катедра „Електрически машини“, тел. +359 2 965-2147, e-mail: pmri@tu-sofia.bg;

Виктор Захариев Захариев, ТУ–София, катедра „Електрически машини“, тел. +359 2 965-2453,, e-mail: sun_goko@gmail.com;

Цветомир Методиев Стоянов, ТУ–София, катедра „Електрически машини“, тел. +359 2 965-2453, e-mail: cmetodiev@tu-sofia.bg;