

ПАРАМЕТРИ НА ТОКОВИ ХАРМОНИЧНИ В ИНДУСТРИАЛНА ФИРМА**Красимир Маринов Иванов¹, Георги Цонев Велев¹, Панайот Янков Иванов¹,
Евтим Руйчов Кърцелин², Николай Стоянов Минеков²**¹Технически университет – Габрово²Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София**PARAMETERS OF CURRENT HARMONIC COMPONENTS IN THE
INDUSTRIAL COMPANY****Krasimir Marinov Ivanov¹, Georgi Tsonev Velev¹, Panayot Ivanov Yankov¹,
Evtim Ruichov Kartselin², Nikolay Stoyanov Minekov²**¹Technical University of Gabrovo, Bulgaria²University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia**Abstract**

The paper describes the problems that non-linear loads cause in the electrical power systems. In that relation, there are specified the respective electromagnetic compatibility parameters associated with harmonic currents flowing into the grid. Results are provided in regard with performed measurement of harmonic currents and the calculated values of the total harmonic distortion coefficients of current on the bus-bars of power transformers and power boards, supplying various loads. Proper recommendations are made to replace the power-supplying cables with new ones, having one and the same cross-section for the phase and the neutral conductors, on the basis of the measurements carried out.

Keywords: electromagnetic compatibility, harmonic distortion, current curve, electric motors, frequency inverters.

ВЪВЕДЕНИЕ

В индустрията и в бита непрекъснато нараства броят на консуматорите с нелинейна волт-амперна характеристика – вентилни преобразуватели, статични източници на реактивна мощност, електродъгови пещи, газоразрядни светлинни източници, зарядни устройства за батерии, електронни баласти и светодиодни светлинни източници и други. В групата на вентилните преобразуватели се включват – токоизправителите, инверторите, преобразувателите на честота, честотните регулатори на асинхронните двигатели и регулаторите на напрежение. Всички тези потребители консумират несинусоидален ток и в резултат на това се получават изкривявания в синусоидите на напрежението и тока.

Целта на доклада е да се предствят проблемите свързани с нелинейните товари в електрическите уредби ниско напрежение и да се направи анализ на осъществени из-

мервания в индустриална фирма на токови фазни хармонични и тези в нулевия проводник.

ПРОБЛЕМИ, СВЪРЗАНИ С НЕЛИНЕЙНИТЕ ТОВАРИ

Хармониците на тока причиняват спадове на напрежение в съпротивленията на електрическите вериги, които се наслагват върху синусоидата на захранващото напрежение и деформират синусоидалната му форма. Това води до влошаване качеството на електрическата енергия подавана към потребителите, което може да доведе до проблеми при експлоатацията им [1, 2].

В трифазна, четирипроводна система, нулевите проводници могат да бъдат засегнати силно от нелинейните товари, свързани към еднофазни вериги с напрежение 230 V. При нормални условия и симетричен линеен товар основната 50 Hz хармонична от фазовите токове се нулира в нулевия

проводник. В четирипроводна мрежа с еднофазни нелинейни товари, нечетните хармоници, кратни на третия хармоник: трети, девети, петнадесети и т.н. - не се нулират, а се сумират в нулевия проводник. При системи с много еднофазни нелинейни товари токът в нулевия проводник всъщност може да надвиши фазовия ток. Резултатът е прекомерно прегряване. В нулевия проводник няма прекъсвачи за ограничаване на тока. По-големият ток в нулевия проводник също така може да причини допълнителен спад на напрежение.

Нулевите шини и проводници са оразмерени така, че да провеждат пълната стойност на номиналния фазов ток. Те могат да бъдат претоварени, вследствие на протичащата през нулевите проводници допълнителна сума от токови хармонични, кратни на три [3]. В уредбите ниско напрежение, предназначени да провеждат 50 Hz токове, могат да се появят резонанси вследствие на генерираните висши хармонични. Когато това се случи, в тези уредби се явяват вибрации със съответните хармонични честоти. Широко разпространените термомагнитни прекъсвачи използват биметален изключващ механизъм, който реагира на топлинния ефект на тока в електрическата верига. Те са проектирани така, че да реагират на действителната ефективна стойност на несинусоидалния ток и се задействат, когато механизъмът за изключване стане твърде горещ. Този тип прекъсвач има добри шансове да предпази оборудването от претоварване, причинено от хармонични токове. Електронният прекъсвач реагира на върховите стойности на формата на вълната на тока. В резултат на това, той не винаги изключва правилно при наличието на хармонични токове. Обикновено върховата стойност на хармоничния ток е по-висока от номиналния и този тип прекъсвач може да изключи преждевременно при по-малък ток. Ако обаче върховата стойност е пониска от номиналния, прекъсвачът може да не успее да изключи, когато трябва. Налице е нарастващо използване на задвижвания с променлива честота (честотни инвертори), които запазват електрически асинхронни двигатели. Напреженията и токовете от честотните инвертори, които запазват да-

ден електрически двигател, са богати на хармонични съставлящи [4]. Хистерезисът и загубите от вихрови токове са част от загубите, които се произвеждат в магнитопровода поради променливото магнитно поле. Хистерезисните загуби са пропорционални на честотата, а загубите от вихрови токове се изменят с квадрата на честотата. Поради това висшите хармонични в напрежението създават допълнителни загуби в магнитопровода на електрическите двигатели, които на свой ред водят до увеличаване на работната температура на магнитопровода и намотките в него. Прилагането на несинусоидално напрежение към електрическите двигатели води до протичане на хармоничен ток в намотките им [5, 6]. Прилагането на несинусоидално възбуждащо напрежение към трансформаторите увеличава загубите в магнитопровода. По-сериозният ефект от хармоничните токове, които протичат през трансформаторите, се дължи на увеличаването на загубите от вихрови токове. Това са циркулиращи токове в проводниците, индуцирани от действието на преминаващото остатъчно магнитно поле през проводниците. Концентрациите на вихрови токове са по-високи в краищата на намотките на трансформатора, поради ефекта на натрупване на остатъчните магнитни полета в краищата на бобината. Проблемът е, че загубите от вихрови токове се увеличават с квадрата на тока в проводника и квадрата на неговата честота. Увеличаването на загубите в трансформатора от вихрови токове, дължащо се на хармоници, има значителен ефект върху работната му температура. Трансформаторите, които се нужни за запазване на нелинейни товари, трябва да бъдат преоразмерени въз основа на процентите на хармоничните компоненти в тока на товара и загубите от вихрови токове в намотките. Протичането на синусоидален ток с честота 50 Hz в даден кабел води до активни загуби, а висшите хармонични в тока водят до допълнителни загуби в проводника. Също така, активното съпротивление на кабела се увеличава с честотата, дължаща се на повърхностния ефект, поради протичането на променлив ток по външната периферия на проводника. Колкото по-висока е честотата на тока, толкова по-голяма е

тази тенденция. Ето защо е важно сумата на основната и висшите хармонични на тока, които могат да протичат в проводника, да се използват за оразмеряване на кабела.

ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ

Известно е, че теорията на електромагнитната съвместимост (ЕМС) се занимава с генерирането, разпространението и приемането на електромагнитна енергия и появата на съпътстващи ефекти при тези процеси. Целта на ЕМС е правилната работа в същата електромагнитна среда на различно по вид оборудване и избягването на всякакъв интерферентен ефект.

В практиката често се използва спектралната форма на представяне на несинусоидалните сигнали. В този случай се използват амплитудно-честотните спектри на кривите на напрежението и тока. Хармоничният състав на кривата на тока се нормира за хармоници от 2-ри до 40-ти включително според коефициента на v -ти хармоник:

$$K_{I(v)} = \frac{I_v}{I_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

и според коефициента на изкривяване на синусоидалната форма на кривата на тока:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Таблица 1 Стойности на емисиите ток за симетрично трифазно оборудване

Мин. ст-т на R_{sce}	Допустима ст-т на коеф. на харм. изкривявания по ток		Допустима ст-т на n -тия хармоник в проценти от основния $I_n/I_1, \%$			
	THD	PWHD	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

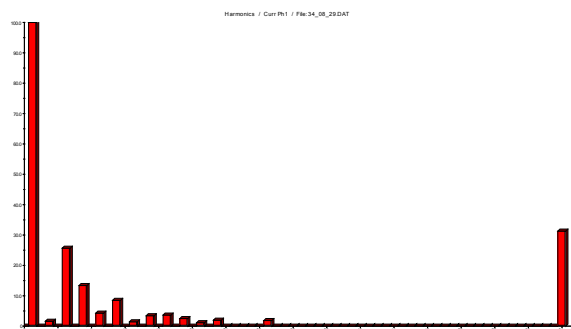
Стандартът IEC 61000-3-4 [7] определя граничните стойности за хармонични съставлящи на тока в нисковолтови електрораз-

пределителни системи за оборудване с номинален ток, по-голям от 16 А на фаза. Коефициентът $R_{sce} = S_{scc}/S_n$ представлява отношение на мощността на късо съединение към номиналната мощност. В IEC 61000-3-4 е въведено и понятието частично измерено хармонично изкривяване (PWHD):

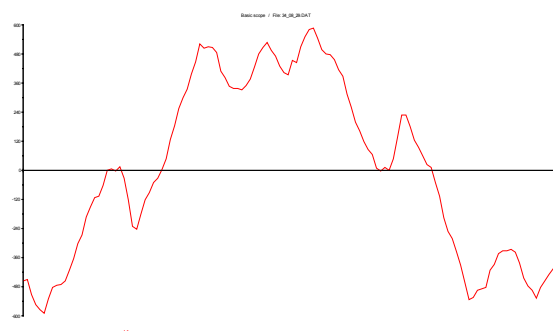
$$PWHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (3)$$

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА

Честотните управления на двигатели водят до увеличаване на хармоничните изкривявания в електрическите мрежи [4, 5, 6]. Тези изкривявания са индивидуални. Те зависят от режима на работа и неговите параметри. За измерването на електротехническите величини е използван мрежов анализатор HT Italia GSC53N.



Фиг. 1. Графика на хармоничните съставлящи от 1 до 50

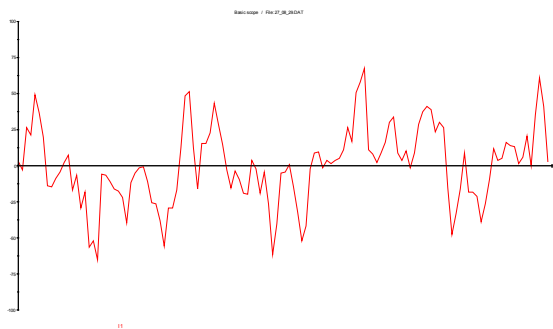


Фиг. 2. Графика на изменение на фазовия ток

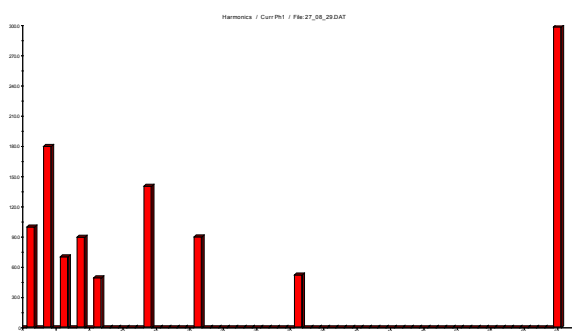
Меренето е извършено на страна 400 V на изходните шини на силови трансформатори с мощност 1600 kVA, захранващи честотни управления на двигатели с различна

мощност. Измерени са трите фазови тока. Коефициентът на хармонично изкривяване по ток е $\text{thd}_{(I)}=31.3$ при включени филтри. На фиг.1 са дадени коефициентите на отделните хармонични спрямо основната хармонична в %.

Основната хармонична е обозначена като 100%, останалите хармонични са изчислени в относителни единици спрямо нея. В този случай преобладават 5 и 7 хармонични на тока. Графиките на останалите фазови токове са аналогични. На фиг. 2 е представено изменението на фазовия ток в момента на снемане на резултатите. Лимитираните нива на индивидуалните хармонични изкривявания по ток и коефициентът на хармонично изкривяване по ток не са надвишени. Филтрите са добре настроени. На фиг. 3 е представен измереният ток в нулевия проводник.



Фиг. 3. Графика на изменение на тока в нулевия проводник



Фиг. 4. Графика на хармоничните съставлящи на тока през нулевия проводник

Коефициентът на хармонично изкривяване по ток е $\text{thd}_{(I)}=298.6$. Стойността на тока през нулевия проводник е в равна на 26,37 А. Токът на трета и петнадесета хармонична се сумират и надвишават този на основната. Това води до повишени загуби в

неутралния проводник и трансформатора.

Претоварването на трансформаторите се отчита посредством т.нар. K -фактор. Има различни дефиниции за K -фактор, като определенията, използвани в Европа и тези в САЩ, са принципно различни.

В европейските стандарти БДС EN 50464-3 и БДС EN 50541-2, съответно за маслени и за сухи трифазни трансформатори, се дава следната формула:

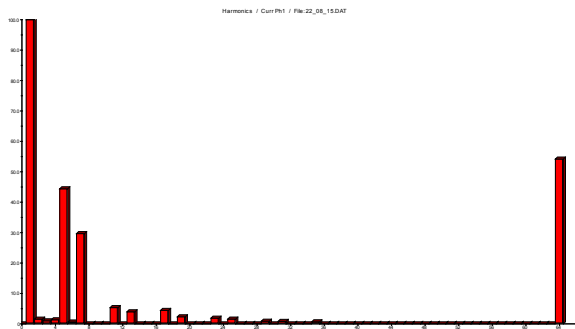
$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{n=2}^{n=N} \left[n^q \left(\frac{I_n}{I}\right)^2\right]}, \quad (4)$$

където: e - отношението между загубите в намотките при синусоидален ток с честота 50 Hz и загубите при постоянен ток със същата ефективна стойност; I_1 е ефективната стойност на тока на първи хармоник, а I_n – тези на висшите хармоници; n е номер на хармоника; q е константа, зависеща от конструкцията на намотките.

Изчислената стойност за хармоничните на този трансформатор се получава равна на $K=1,11$. Максималната продължителна мощност, до която може да се натоварва един трансформатор, подложен на несинусоидални токове, се намалява, като номиналната му мощност се раздели на K -фактора. Реалната използвана мощност на този трансформатор е 0,9 S_N . Де факто се получава преоразмеряване, тъй като за дадена работна мощност трябва да се избере трансформатор с по-голяма номинална такава. Изхождайки от стойността на полученния K -фактор може да се подобри още дейността на филтрите.

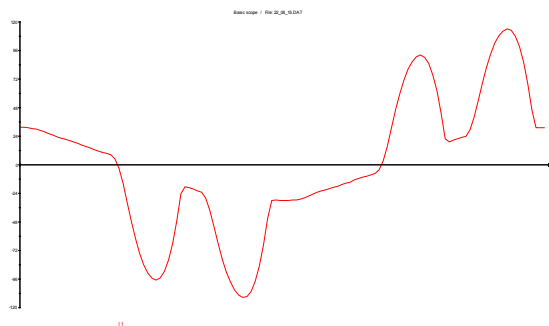
Меренето във втория случай е извършено на страна 400 V на изходните шини на захранващото табло, присъединено към същия трансформатор с мощност 1600 kVA, захранващ честотно управление на двигател с мощност 60 kW. Коефициентът на хармонично изкривяване по ток е $\text{thd}_{(I)}=54.17$. На фиг. 5 са дадени коефициентите на отделните хармонични спрямо основната хармонична в %. Подходът на построяване на графиката е аналогичен на фиг. 1. Графиките на останалите фазови то-

кове са аналогични. И в този случай преобладават 5 и 7 хармонични на тока. Лимитираните нива на индивидуалните хармонични изкривявания по ток и коефициентът на хармонично изкривяване по ток не са надвишени. Филтрите са включени и настроени подобаващо и коефициентът на хармонично изкривяване по ток намалява [8]. На фиг.6 е представено изменението на фазовия ток в момента на снемане на резултатите.



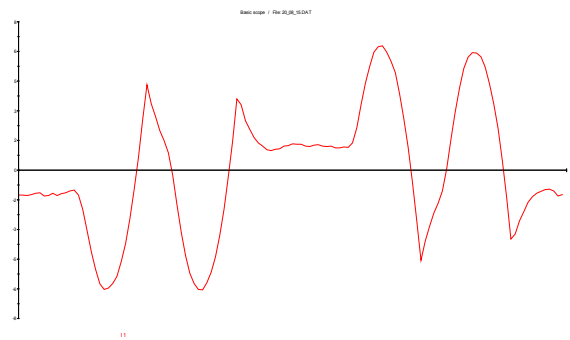
Фиг. 5. Графика на хармоничните съставлящи от 1 до 50

На фиг. 7 е представен токът в нулевия проводник. Коефициентът на хармонично изкривяване по ток $thd_{(I)}=148,16$. Стойността на тока през нулевия проводник е в равна на 3,42 А.

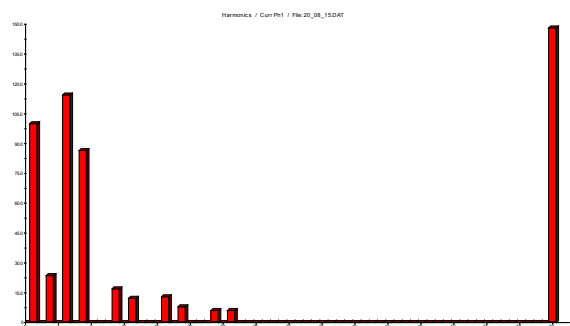


Фиг. 6. Графика на изменение на фазовия ток

Амплитудният състав на хармоничните в тока на нулевия проводник е представен на фиг. 8. Токовете на трета и петнадесета хармонична във фазовите токове се сумират в нулевалата и този на третата хармонична надвишава тока на основния хармоник. Това води до повишени загуби в нулевия проводник и трансформатора.



Фиг. 7. Графика на изменение на тока в нулевия проводник



Фиг. 8. Графика на хармоничния състав на тока през нулевия проводник

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В индустрията нараства броят на консуматорите с нелинейна волт-амперна характеристика. Проведените измервания в индустриална фирма на токовете хармоници във фазовите и нулевите проводници показват, че индивидуалните хармонични изкривявания и коефициентът на хармонично изкривяване по ток надвишават допустимите норми в нулевия проводник въпреки действащите филтри, което води до допълнителни загуби в тези проводници и захранващите трансформатори. Повишаването на нивото на висшите токове хармонични преминаващи през силовите трансформатори води до увеличаване на фактора К, тоест до намаляване на реалната му използвана мощност. Практиката на избор на по-малки сечения за нулевите проводници и шини е неуспешна, т.к. повишените нива на висши хармоници на тока водят до повишено нагряване и загуби.

REFERENCE

- [1] Finding the problems, related to harmonics, Energy, Year X, Vol. 5, 2018.

- [2] G. Mueller, E. Bunzel: Harmonic losses in low-voltage asynchronous machines, Part II: Analytical investigations. Publication in "Die Antriebstechnik", year 2000, issue 9
- [3] Jelenko, I. V., Electrical compatibility of power consumers: monograph – M.: Mechanical Engineering, 2012, p.351.
- [4] Power System Harmonics, Causes and Effects of Variable Frequency Drives, Relative to the IEEE 519-1992 Standard, Bulletin No. 8803PD9402, August, 1994, Raleigh, NC, U.S.A.
- [5] Lucian Asiminoaei, Stefan Hansen , Frede Blaabjerg, Harmonic calculation software for industrial applications with adjustable speed drives, EPE 2005 – Dresden, p1-7.
- [6] Stefan Chobanov, Milen Drenkov, Mento Menteshhev, Experimental study and analyzes of higher harmonics in mine electrical power networks with frequency driven electrical motors, Annals of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 56, Book III, Mechanization, Electrification and Automation of Mines, 2013, pp. 113 – 119.
- [7] IEC 61000-3-4: 1998. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A.
- [8] Karve, S. Active Electrical Power Network Filters 3.3.3, Guide to Power Quality, Deutsches Kupferinstitut, May 2002;