

POWER QUALITY ANALYSIS IN FREQUENCY INDUCTION MOTOR DRIVES

IVAN KOSTOV, DIMITAR SPIROV

Abstract. *The increased requirements towards supervision, control and performance in modern electric drives make power quality monitoring a common practice. This article presents the experimental results of an evaluation of the electromagnetic compatibility of induction motors fed by frequency converters. Pulse width modulation (PWM) is investigated for various output frequencies of the V/f law and several carrier frequencies using a sinusoidal filter. The aim of the work presented in this paper is the development of tools for analyzing monitoring data and in particular for measuring voltage and current quality. The main objective of the analysis is the identification of the harmonic voltage and current factors. Measurements and simulations are used for the analysis of these factors.*

Key words: *power quality, electromagnetic compatibility, voltage drops, electric drives faults, induction motors, fast Fourier transform.*

АНАЛИЗ НА КАЧЕСТВОТО НА ЗАХРАНВАНЕТО В ЧЕСТОТНИ АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

1. Въведение

Увеличените изисквания за икономия и ефективно преобразуване на енергията в съвременните електрозадвижвания правят оценките за електромагнитна съвместимост (ЕМС) обичайна практика. Качеството на захранването се оценява чрез измерване на електромагнитните явления в определена точка на захранването на асинхронния двигател (АД). Целта на измерването може да бъде [1]:

- оценката на (не)съвместимост на изхода на преобразувателя с АД.
- оценката на електрическото обкръжение, за да усъвършенстват методите на моделиране или за разработване на базовата линия за повишване на качеството на захранването.
- прогнозиране на бъдещото развитие на натоварващото оборудване или намаляване на устройствата, влошаващи качеството на захранването.

Електромагнитната съвместимост се характеризира със следните основни показатели, дефинирани в стандартите [5,6,7,8] и свързани с оценката на несинусоидалността на тока и напрежението, несиметрията в трифазните

системи на тока и напрежението, неуравновесеността в трифазна система, отклонението и колебанието на напрежението. Основните характеристики на несинусоидалността на тока и напрежението са коефициентите на хармониците на тока и напрежението, коефициентите на несинусоидалност (общо изкривяване на хармониците) на напрежението и тока, претеглените коефициенти на несинусоидалност на напрежението за индуктивност и за кондензатори. Коефициентите на хармониците на тока и напрежението се използват за проектиране и избор на компенсиращи филтри, за оценка степента на претоварване на елементите на захранващия източник и за контролиране на устройствата, които генерират висши хармоници [2,3]. Коефициентите на несинусоидалност са предназначени за оценка на топлинното нагряване и допълнителните загуби на активна мощност в елементите на електрозадвижването [4]. Тези характеристики имат голямо значение за ефективното проектиране на електрозадвижвания и техните системи за управление. Съществуващите

измервателни анализатори не могат да измерват параметрите на захранващата мрежа за честоти, различни от 50-60Hz [9].

2. Стандарти и качество на енергията

Европейският стандарт 50160 определя основните характеристики на напрежението при мрежи средно и ниско напрежение [5,10]. Този стандарт дефинира характеристиките на напрежението от честотата, амплитудата, изкривявания на формата и симетрия на трите фази:

- вариране на честотата: номиналната честота трябва да бъде 50 Hz. При нормално работно състояние основната честота, средна за период от 10 s, например за 99.5% от седмицата, не трябва да варира с повече от ±1%;

- колебания на напрежението: за период от една седмица, 95% от ефективната стойност (измерена средно за 10 min), не трябва да превишава ±10%;

- бързите колебания на напрежението са предизвикани обикновено от бързи изменения на товара. За нормално работно състояние бързите колебания не трябва да превишават 5% при мрежи ниско напрежение и 4% при мрежи средно напрежение;

- спадовете на напрежението са предимно случайни и тяхното появяване зависи от типа на преносната мрежа и мястото на наблюдение. Спадовете трябва да бъдат под 60% за по-малко от 1s;

- дисбаланс на напрежението: за период от 1 седмица, за 95% от времето, за средната стойност за 10 min, дисбалансът за отрицателния полупериод не трябва да превишава 0%, а за положителния – 2%;

- хармоничен състав на напрежението: за период от 1 седмица, за 95% от времето, за средната за 10 min ефективна стойност на напрежението;

- основен за EMC на АД със захранващата мрежа е [7] претегленият коефициент на несинусоидалност на напрежението за индуктивни товари, който не бива да е по-голям от 1.5% за двигателите в нормално изпълнение.

3. Количествено определяне на показатели на EMC

- коефициенти на хармониците на тока и напрежението:

$$k_{Iv} = \frac{I_v}{I_1} 100 \tag{1}$$

$$k_{Uv} = \frac{U_v}{U_1} 100 \tag{2}$$

- коефициентите на несинусоидалност (общо изкривяване на хармониците, THD) на тока и напрежението:

$$k_{ncI} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n I_v^2}}{I_1} 100 \tag{3}$$

$$k_{ncU} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_1} 100 \tag{4}$$

- претеглени коефициенти на несинусоидалност на напрежението за индуктивности и за кондензатори (HVF):

$$k_{nc\ ind} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n \frac{U_v^2}{v^\alpha}}}{U_1} 100 \tag{5}$$

$$k_{nc\ cap} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n (vU_v)^2}}{U_1} 100 \tag{6}$$

В горните формули:

- I_v и U_v са хармонични съставки (хармоници), съответно на тока и напрежението;
- v - номер (ред) на хармониците;
- α - параметър, който приема стойности 1 и 2.

Съгласно стандартите коефициентът на всеки хармоник на напрежението не трябва да превишава стойността, дадена в табл. 1. Освен това общото хармонично изкривяване (THD), определено по израз (4), не трябва да превишава 8%.

Таблица 1а
Коефициенти на нечетните хармоници на напрежението

номер на хармоника	k_{Uv}	номер на хармоника	k_{Uv}
5	6%	3	5%
7	5%	9	1.5%
11	3.5%	15	0.5%
13	3%	21	0.5%
17	2%	23	1.5%
19	1.5%	25	1.5%

Таблица 1б
Коефициенти на четните хармоници на напрежението

номер на хармоника	k_{Uv}
2	2%
4 (6-24)	1% (0.5%)

За дефиниране на хармоничния състав са налице допълнителни стандарти, като по-

важните от тях са IEC 1000-4-7 и IEEE 519. Стандартът IEC 1000-4-7 дефинира методите и измервателните устройства, които трябва да бъдат използвани при измерването на хармоничния състав [6,10]. Стандартът IEEE 519 дава насоки и определя ограниченията за хармоничния състав в две направления: ограничения за хармоничния състав на тока, доставяни в системата от консуматорите и ограничения за хармоничния състав на напрежението, доставяно на консуматорите [8,10]. Този стандарт препоръчва общото хармонично изкривяване на напрежението да не превишава 5%, а на тока да се ограничи от диапазона от 2.5% до 20% в зависимост от вида на захранващата мрежа и големината на товара. Стандартът 60034-2-1 [7] определя като водещи при работа на АД с мрежата претеглените коефициенти за несинусоидалност на напрежението, които за индуктивни товари се определят по (5).

4. Резултати

Създадена е опитна установка за количествената оценка на ЕМС на индуктивен товар (АД) с преобразувател на честота (ПЧ) с широчинно-импулсна модулация (ШИМ) и синусоидален филтър, включен между двигателя и преобразувателя със следните данни:

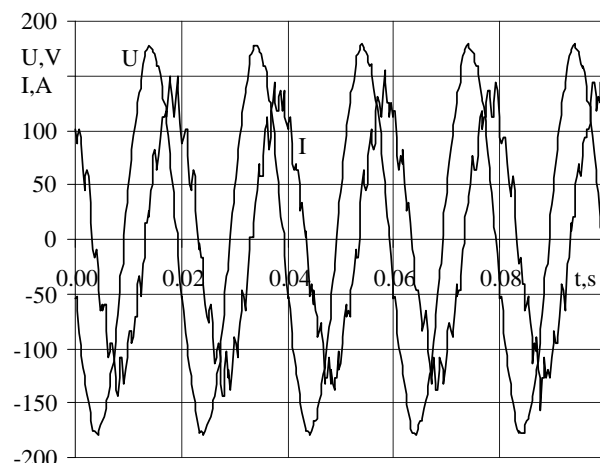
- АД тип T90S4B3, $n_N=1410\text{min}^{-1}$, $I_N=2.9\text{A}$, $\cos\varphi_N=0.78$, $P_N=1.1\text{kW}$;

- ПЧ тип 3G3MV на Yaskawa с $P_N=1.1\text{kW}$;

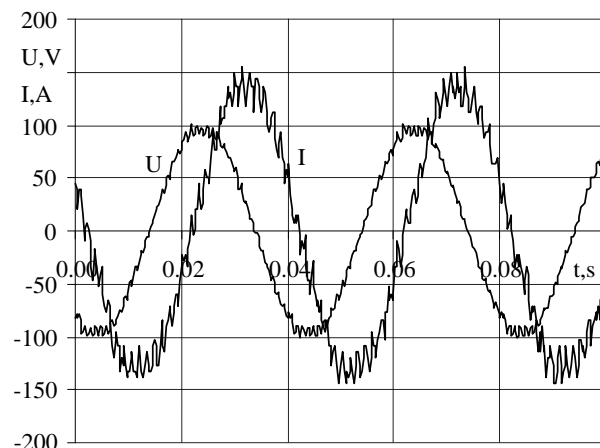
- Синусоидален филтър с $L=30\text{mH}$, $C=1\mu\text{F}/1000\text{V}$.

Експерименталните изследвания на електродвигателя се проведеха с измервателна система, която съдържа модул за преобразуване на измерваните величини и измервателна компютърна платка NI USB-6009 на фирмата National Instruments за преобразуване на измерените величини във вид, подходящ за обработка от компютъра. Модулът за преобразуване на измерваните величини включва сензори, работещи на принципа на ефекта на Хол (Хол трансдюсери) за преобразуване на напреженията и токовете на клемите на АД в пропорционален напрежителен сигнал със стойност, подходяща за подаване на измервателната компютърна платка. Хол трансдюсерите са съответно напрежителен трансдюсер LV25-P и токов трансдюсер LTS-15NP на фирмата LEM. За измерването на трите фазни тока i_{sA} , i_{sB} и i_{sC} са използвани три токови трансдюсера, а за измерване на трите фазни напрежения u_{sA} , u_{sB} и u_{sC} са използвани три напрежителни трансдюсера.

С помощта на разработената измервателна компютърна система бяха измерени зависимостите на статорните токове и напрежения на клемите на АД във функция от времето при изходна честота f_{out} на подаваното от преобразувателя на честота напрежение съответно 25Hz и 50Hz, носеща честота на ШИМ сигнала $f_{сиг}$ съответно 0.9, 2.5, 5.0, 7.5 и 10,0kHz за установения режим на празен ход. Част от получените резултати са дадени на следващите фигури. На фигурите мащабът на тока е увеличен 100 пъти.



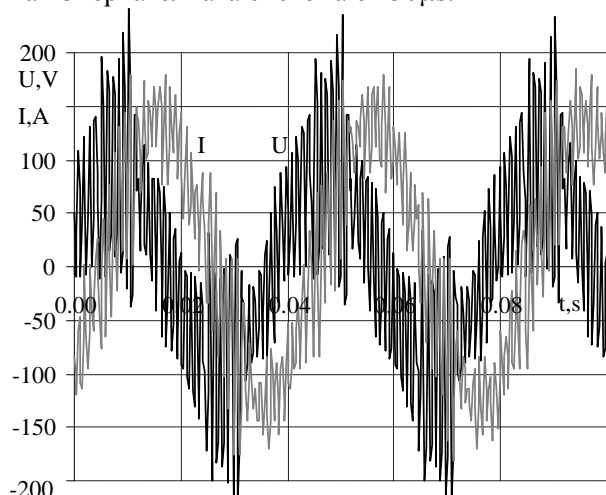
Фиг. 1. Напрежение и ток на клемите на двигателя.



Фиг. 2. Напрежение и ток на клемите на двигателя.

На фиг.1 е показана формата на тока и напрежението при изходна честота 50Hz и носеща честота на ШИМ 5000Hz; на фиг.2 е показана формата на тока и напрежението при изходна честота 25Hz и носеща на ШИМ 5000Hz, а на фиг.3 - изходна честота 25Hz и носеща на ШИМ 900Hz. Условия на опитите – измерени са трите фазни напрежения и трите фазни тока на празен ход на двигателя, който е свързан в звезда. Продължителността на

измерването е 100ms, стъпката на дискретизация на измервателната система е 250µs.



Фиг. 3. Напрежение и ток на клемите на двигателя.

Записаните с измервателната система сигнали са разложени в хармоничен ред с помощта на вградените функции на програмния продукт Simulink. В табл. 2 и табл. 3 са систематизирани резултатите, получени за ефективните стойности на напрежението (U_{TRMS}) и тока (I_{TRMS}), техните първи хармоници (U_{1RMS} , I_{1RMS}), HVF и пълните хармонични изкривявания съответно на напрежението THDU и на тока THDI за различните изследвани случаи до 13 хармоник.

Таблица 2

f_{out}	f_{carr}	U_{TRMS} U_{1RMS}	I_{TRMS} I_{1RMS}	HVF	THDU THDI
Hz	kHz	V	A	%	%
25	0.9	86.50	0.980	<1.0	78.0
		68.19	0.920		35.0
25	2.5	69.00	0.980	<0.8	10.0
		68.57	0.966		11.0
25	5.0	68.57	0.960	<0.8	4.0
		68.66	0.946		10.0
25	7.5	68.57	0.960	<0.8	3.5
		68.77	0.951		10.0
25	10	68.75	0.975	<1.0	3.0
		68.81	0.970		10.0

Таблица 3

f_{out}	f_{carr}	U_{TRMS} U_{1RMS}	I_{TRMS} I_{1RMS}	HVF	THDU THDI
Hz	kHz	V	A	%	%
50	2.5	126.0	0.92	<0.90	5.0
		125.6	0.90		12.0
50	5.0	125.3	0.89	<0.90	3.0
		125.2	0.88		12.0
50	7.5	125.5	0.89	<0.90	2.5
		125.4	0.883		12.0
50	10	124.5	0.890	<0.90	2.5
		124.5	0.875		11.0

Таблица 4

f_{mp}	U_{TRMS}	U_{1RMS}	HVF	THDU
Hz	V	V	%	%
50	235.0	234.8	0.90	2.50
50	225.0	224.7	1.30	3.00

В табл. 5 и табл. 6 са систематизирани резултатите, получени за ефективните стойности на напрежението и тока, техните първи хармоници, HVF и пълните хармонични изкривявания съответно на напрежението THDU и на тока THDI от същите експерименти до 13 хармоник, но с помощта на вградените функции на програмния продукт MATLAB.

Таблица 5

f_{out}	f_{carr}	U_{TRMS} U_{1RMS}	I_{TRMS} I_{1RMS}	HVF	THDU THDI
Hz	kHz	V	A	%	%
25	0.9	94.207	1.0031	3.99	105.00
		57.401	0.7842		44.022
25	2.5	69.355	0.9691	0.97	4.5731
		58.442	0.8135		8.7917
25	5.0	68.7756	0.9666	0.92	5.3130
		58.3064	0.8082		5.0494
25	7.5	68.7417	0.9665	0.75	2.3437
		57.7419	0.8164		5.6467
25	10	68.824	0.9748	0.48	1.0171
		58.000	0.8260		4.9679

Таблица 6

f_{out}	f_{carr}	U_{TRMS} U_{1RMS}	I_{TRMS} I_{1RMS}	HVF	THDU THDI
Hz	kHz	V	A	%	%
50	2.5	126.07	0.9151	1.10	2.7192
		117.80	0.8528		5.5051
50	5.0	125.36	0.8963	0.98	2.9607
		117.79	0.8322		6.8774
50	7.5	125.55	0.8980	0.88	2.3233
		118.00	0.8338		6.6394
50	10	124.45	0.8891	1.04	2.4791
		116.83	0.8255		5.7020

В табл. 4 и табл. 7 са систематизирани за сравнение резултатите, получени за ефективните стойности на напрежението техните първи хармоници, HVF и пълните хармонични изкривявания THDU на напрежението на мрежата до 13 хармоник с помощта съответно на програмните продукти Simulink и MATLAB.

Във всички случаи се наблюдава HVF по-малък от дефинирания в стандарта [7]. Подобни са резултатите за THDU и THDI. С малки изключения по-високата носеща и по-ниската изходна честоти дават по-добри показатели на EMC.

Таблица 7

f_{mp}	U_{TRMS}	U_{IRMS}	HVF	THDU
Hz	V	V	%	%
50	235.0	220.3	1.04	2.26

В табл. 8 са систематизирани, отново за сравнение, резултатите, получени за ефективните стойности на напрежението и първия му хармоник на трите фази на захранващата мрежа, HVF и пълните хармонични изкривявания THDU до 13 хармоник с помощта на измервателната система PowerLogic на фирмата Schneider Electric. Броят на измерените стойности на системата е 512 за периода на напрежението на мрежата $1/f_{mp}=T_{mp}=20ms$.

Таблица 8

f_{mp}	U_{TRMS}	U_{IRMS}	HVF	THDU
Hz	V	V	%	%
50	235.0	234.96	0.72	1.65
	235.0	234.97	0.68	1.56
	235.0	234.97	0.65	1.56

5. Заключение

Направен е преглед и са обобщени показатели на EMC, систематизирани са изисквания към качеството на захранващата мрежа, наложени от новите стандарти за производство и експлоатация на АД.

Разработен е инструментариум за оценка на електромагнитната съвместимост на преобразувател на честота с ШИМ и със синусоидален филтър в изхода и асинхронен двигател.

Проведени са експериментални измервания на напрежението и тока на клемите на двигателя, резултатите са обработени с различни математични апарати.

Въпреки неизбежните различия в крайните резултати, със сигурност може да се направи изводът, че както захранващата мрежа, така и ПЧ със синусоидални филтри в изхода задоволяват изискванията за електромагнитна съвместимост на асинхронните двигатели в трифазни захранващи мрежи.

Проведените експерименти поставят и редица проблеми за разрешаване, по-важните от които са:

- разработване на методика за проектиране на синусоидални филтри и инженерен подход за техния избор и приложение в електрозадвижванията;

- проверка на възможността за използване и разработване на модели за оценка на EMC на ПЧ и АД без синусоидален филтър;

- оценка на точността на различни измервателни системи и математични апарати при определяне на качеството на захранването на АД.

- проверка на влиянието на вида ШИМ върху показателите на EMC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидеров С., Н. Матанов, Б. Бойчев, В. Георгиев, Алгоритъм за оценка на основни показатели на електромагнитна съвместимост в електрозахранителни системи с микропроцесорен анализатор, 50 години Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, Годишник, том 46, свитък III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, София, 2003, стр. 175-179.

2. Шрейнер Р.Т., Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты, Екатеринбург: УРО РАН, 2000 г., с.654.

3. Boldea I., S.A. Nasar, Electric drives, CRC Press, 1998.

4. Bose B., Power Electronics and Motor Drives - Advances and Trends, Academic press, 2006, pp.915.

5. EN 50160-1999, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution system.

6. IEC 1000-4-7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected.

7. IEC 60034-2-1, Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).

8. IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.

9. Krishnan R., Electric Motor Drives. Modeling, Analysis, and Control, Singapore, 2003, ISBN 81-297-0319-1, pp.650.

10. Zamora I., A.J. Mazón, V. Valverde, E. Torres, Dyško A., Power Quality and Digital Protection Relays, University of the Basque Country, 2004.

Department of Control Systems
 Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
 25 Tsanko Dyustabanov Str.
 4000 Plovdiv
 BULGARIA
 e-mail: ijk@tu-plovdiv.bg
 e-mail: dimitar_spirov@abv.bg