

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2019

АНАЛИЗ НА РАБОТАТА НА СИЛОВ ТРАНСФОРМАТОР, ЗАХРАНВАЩ КОМБИНИРАН НЕЛИНЕЕН ТОВАР В ОБЩЕСТВЕНИЯ СЕКТОР – ЧАСТ I – ХАРАКТЕРНИ ОСОБЕНОСТИ В СЛУЧАИТЕ ПРИ ЗАХРАНВАНЕ НА НЕЛИНЕЙНИ ТОВАРИ

Димитрина Коева, Свилен Рачев, Любомир Димитров

ANALYSIS OF THE POWER TRANSFORMER OPERATION SUPPLYING A COMBINED NON-LINEAR LOAD IN THE PUBLIC SECTOR - PART I - CHARACTERISTICS IN THE CASE OF SUPPLYING NON-LINEAR LOADS

Dimitrina Koeva, Svilen Rachev, Lyubomir Dimitrov

Abstract

From the point of view of energy efficiency optimization, the operating modes of frequently used electrical equipment - the transformers supplying combined non-linear loads in the public sector - are of interest. Modern transformers can be more efficient than ever and at the same time economical. In recent years, there has been a significant increase in electronics, computer technology or other complex equipment integrated into the industrial and public sector. All these devices are a source of harmonics (harmonics of currents and voltages) which, with their harmful influence, increase the losses in transformers and motors, load their windings thermally and generally reduce the efficiency of the electrical system. Paper deals with analyzing the operation of a power supply transformer for a specific site - public building – with evaluation of the harmonics of the current.

Увод

Счита се, че грижа на електроразпределителните дружества са общите разходи за придобиване, монтаж, обслужване и поддръжка на силовите трансформатори, като те са включени във формулата за капитализация. Това позволява да се предвидят загубите по време на целия очакван жизнен цикъл на трансформатора. Рядко има обратна връзка и изследвания в посока на влияние на товара върху надеждната

работа на трансформатора за всеки конкретен случай. Известно е, че трансформаторите, хранващи нелинейни товари, увеличат температурата на намотките си, поради хармониците на токовете, генерирани от тези товари и това води до съкращаване на експлоатационния живот на трансформатора [1, 2, 3]. Други неприятни последици от действието на хармониците са: прегряване на неутрални проводници и панели, изключване на прекъсвачи, нарушаване на мрежовото напрежение, отказ на оборудване, електрически пожари, неправилно функциониране на контролните уреди и смущения в комуникационните линии. Известни са потенциалните рискове за безопасността и надеждната работа, свързани с използването на стандартни трансформатори, хранващи нелинейни товари, [5, 6].

Основни задачи в случая са да се анализира работата на силов хранващ трансформатор за конкретен обект: публична сграда с нелинейни товари. Интерес представлява оценка на възможността за инвестирането в подходящ енергийно ефективен трансформатор, което би означавало намаляване на загубите на енергия и ограничаване на въздействието върху околната среда, както и редуциране на разходите за ремонт и поддръжка.

Същност на проблема

Техническите средства в енергетиката, индустрията, търговията и общественения сектор, (електронно оборудване, двигатели, пещи, зарядни станции, UPS системи и др.) са нелинейни товари и са източници на хармонични изкривявания на токовете. Нелинейните товари влияят неблагоприятно на всички компоненти на електроенергийната система: увеличават загубите в трансформатори и двигатели като натоварват топлинно намотките им, увеличават диелектричните и/или механичните загуби и като цяло намаляват ефективността на електрическата система. Тези състояния се предизвикват най-често от хармоници с номера $\mathcal{J} = 3, 5, 7, 11$ и 13 . До скоро единственото решение е било избор на по-голям по мощност трансформатор с цел справяне с допълнителното загряване на намотките и магнитопровода. Това решение е икономически и технически неприемливо вече.

Стандартните трансформатори (немаркирани с т.нар. К-фактор)

имат малък температурен толеранс при работа с нелинейни товари. Степента на справяне с такива товари и лошите последици при работа не са достатъчно изследвани, но е известно, че при продължителна работа на трансформатора с 8 °C над класа на изолация, срокът на надеждна работа на трансформатора се съкращава с 50% (правило на Montziger). Други неприятни последици от действието на хармониците са: прегряване на неутрални проводници и панели, изключване на прекъсвачи, нарушаване на мрежовото напрежение, отказ на оборудване, електрически пожари, неправилно функциониране на контролните уреди и смущения в комуникационните линии.

Често наблюдавана лоша практика е да се използват стандартни техники за проектиране, като се прилагат изолационни материали с високи температурни класове. Тази практика за подсилване в термично отношение всъщност увеличава цената на трансформатора като цяло. Друга особеност е, че всеки трансформатор, захранващ нелинейни товари има необходимост от допълнителна защита по ток вследствие претоварване, допълнителното нагряване и/или превишаване на допустимата температура поради неправилно охлаждане [3, 4].

Признават се потенциалните рискове за безопасността и надеждната работа, свързани с използването на стандартни трансформатори, захранващи нелинейни товари. Препоръките са дадени в UL 1561/2011 (Standard for Dry-Type General Purpose and Power Transformers) и са известни като трансформаторни К-коэффициенти, или К-фактори, (UL – Underwriters Laboratories е световна научно-техническа компания с експертна дейност по съгласуване и представяне на стандарти с приложение в индустрията. UL работи с конструкторите на General Electric) [1, 7].

Други препоръчителни стандарти, отнасящи се за трансформатори са:

1. NEMA ST 20, (Трансформатори с общо предназначение);
2. NEMA 250, (Трансформатори за враждане, за електрически уредби до 1000V);
3. NEMA TP1 (Енергоефективни трансформатори в разпределителни уредби);
4. NEMA TP2 (Тестове и методи за измерване на консумацията на електрическа енергия на трансформатори в разпределителни уредби);
5. NEMA TP3 (Стандарт за означаване и етикетиране на трансформатори за разпределителни уредби);
6. ANSI/IEEE C57.12.91, (Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers);

7. NFPA 70, National Electrical Code;
8. IEEE C2, National Electrical Safety Code;
9. IEC 60076-7, Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers.

През 1990 г. лабораториите по техническа безопасност в САЩ обявяват списък със стандартните конвенционални трансформатори, подложени на тези хармоници. Целта е да се тестват по време на работа при различно натоварване и респективно влияние на средноквадратичните стойности на тока и да се търси корелация с увеличените топлинни загуби. Факторите, отчитани при това тестване са обединени под името К-фактор. За да може правилно да бъде определен К-факторът е необходимо всеки товар да се идентифицира с неговите хармоничен спектър и амплитуди. Така К-факторът се дефинира като способността на трансформатора да се справи с вредното влияние на хармоничните съставки на токовете на нелинейните товари по време на работата си, в определен температурен диапазон, определен от класа на изолацията му.

Трансформаторите, захранващи нелинейни товари трябва да отговарят на посочените стандарти. Например, трансформатори с мощност ≤ 15 kVA трябва да бъдат с допълнително охлаждане, като се съблюдава температурният рейтинг според класа на изолацията на намотките (80 °C, 115 °C, 150 °C) при приета температура на околната среда 40 °C.

UL (Underwriters Laboratories) оценяват потенциалните вредни въздействия от нелинейните товари и са изготвили рейтингова система UL-1561 с К-фактори, (К-фактор=1 е линеен товар без хармоници):

$$K_{factor} = \frac{\sum_{g=1}^{g=25} (I_g)^2 g^2}{\sum_{g=1}^{g=25} (I_g)^2},$$

където: g и I_g – пореден номер на хармоника и големина на съответната хармонична съставляща на тока.

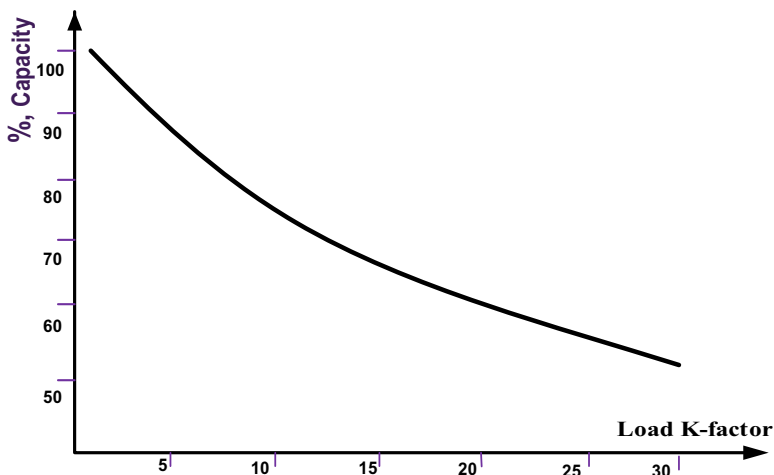
В края на 1996 г. ANSI/IEEE формулира стандарт C57.110 „Препоръчителни методи за определяне на натоварването на трансформатори при несинусоидални токове на товара“ [1], (‘IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Current’), който представя категоризация на нели-

нейните товари и методика за определяне на К-фактора, като по този начин се определя профилът на товара. Стандартът е приложим за силови трансформатори с мощност до 50 MVA, захранващи нелинейни товари с хармоничен фактор над 5%. Не включва трансформатори за електроинструменти, регулатори на напрежение, трансформатори към преобразуватели и трансформатори в мините.

При нелинейни товари с изявен хармоничен състав, през неутралата протичат големи токове (понякога до 200% от фазовия ток). Затова трансформаторите, които отговарят на изискванията на К-фактора имат осигурен подсилен проводник на неутралата. Освен това се наблюдава т. нар. повърхностен ефект при вторичната намотка W_2 . Поради високите честоти на хармоничните съставлящи, токът все едно се „движи“ по външната повърхност на проводниците на вторичната намотка. За да се компенсира този ефект, W_2 се допълва от няколко транспонирани проводници с по-малко сечение, с което се увеличава общата повърхност на слоевете на всички проводници. Специалната конструкция включва и намаляване на магнитопровода за компенсиране на изкривяванията вследствие хармоничните на напрежението.

Влошаването на изолационните свойства на материалите, използвани в трансформаторите води до лоши диелектрични свойства и следователно се намалява устойчивостта на къси съединения. В К-трансформаторите се използва иновационна хибридна високотемпературна изолация, благодарение на която се разширява работният температурен диапазон, увеличава се механичната здравина на конструкцията, намаляват се разходите за ремонт и поддръжка. В конструктивно отношение се намалява броят на вентилационните канали за охлаждане между слоевете, постига се по-добро укрепване на бобините и повишена надеждност. Тези трансформатори са високо енергийно ефективни, имат увеличено време за безотказна работа при пълно натоварване и респективно малък срок на откупуване.

Счита се, че топлинните загуби в намотките са пропорционални на поредния номер на хармоника. Колкото нелинейният товар е с изявени хармоници, толкова повече е необходимо да се намали допустимата степен на натоварване, фиг. 1 [2, 3].



Фиг. 1. Зависимост на степента на натоварване на трансформатора от К-фактора на товара, [1].

Ако трансформатор с К-1 при пълно натоварване има допустима температура $\tau_n = 115^\circ C$, то при К-13, например, натоварването трябва да се намали до 70% и да се форсира охлаждането. Трансформатор с К-4 и пълно натоварване генерира 10% ВТУ (British Thermal Unit) повече от трансформатор с К-1. При трансформатор с К-13 и пълно натоварване отделянето на топлина е с 25% ВТУ повече от трансформатор с К-1.

Допълнителното нагряване на изолацията на намотките, вследствие на влиянието на висшите хармоници може да се определи чрез изрза [3, 5, 6]:

$$\Delta \tau_T = 0.6 \tau_n \sum_{g=2}^{g=25} K_{i,g}^2 K_{r,g},$$

където: $K_{i,g}$ – относителна стойност на хармоник на тока, протичащ през трансформатора с номер g (в части спрямо първи хармоник); $K_{r,g}$ – коефициент, отчитащ нарастването на съпротивлението на намотките, вследствие скин-ефекта (повърхностен ефект) и ефект на близостта. Приблизително се приема $K_{r,g} = \sqrt{g} \tau_n$ – температура на изолацията при синусоидално захранване, т.е. К-1.

При определянето на К-фактора на товар проблем се явява изборът на действащи хармоници. Съществуват два подхода, [2, 3, 7, 8]: оценка на влиянието до $\mathcal{D}=15$ и до $\mathcal{D}=25$. Много рядко се определя К-фактор за хармоници до $\mathcal{D}=50$. Важно е да се знае, че при определен нелинеен товар изчисленията могат да бъдат различни, в зависимост от това кои хармоници избираме да включим. Дори и малки токове на хармонични с висок пореден номер съществено изменят крайния резултат. UL стандартизират нелинейните товари в 7 категории – Табл. 1. В случаите на съчетано захранване на разнотипни нелинейни товари, К-факторът на захранващия трансформатор се избира равен на най-големия от нелинейните товари (в противен случай работата на трансформатора е ненадеждна и небезопасна). Предимството на използването на К-трансформаторите е, че те обикновено са по-енергоефективни от използването на конвенционален трансформатор с по-голяма мощност и ниска степен на натоварване. Препоръчва се мощността на трансформатора да се избере, като изцяло се съобразим с особеностите на товара: оперативно/работно напрежение, kV; работна честота, Hz; допустим товар (kVA, A, kW); брой фази (трифазни или еднофазни товари); фактор на мощността на товара (PF). Изборът на К-трансформатор за конкретен нелинеен товар, независимо от мощността, не означава, че той е защитен от хармоничните съставки на напрежението (предизвикващи загриване на магнитопровода), от механични напрежения или от вредното влияние на настъпили резонансни явления.

Табл. 1. Категории нелинейни товари

Тип на товара	К-фактор	Индекс на К-фактор, I_{LK}
С нажежаема спирала	К-1	0.00
Измервателни трансформатори, електромагнитни устройства за управление	К-1	0.00
Двигатели, генератори (без управление)	К-1	0.00
Разпределителни трансформатори	К-1	0.00
ПРА на компактни луминесцентни лампи	К-4	25.82
UPS с входни филтри	К-4	25.82
Заваръчни агрегати	К-4	25.82
Установки за индукционно нагриване	К-4	25.82
PLC и контролери за управление	К-4	25.82
Системи за телекомуникация за пренос и обмен на данни	К-13	57.74
UPS без входни филтри	К-13	57.74

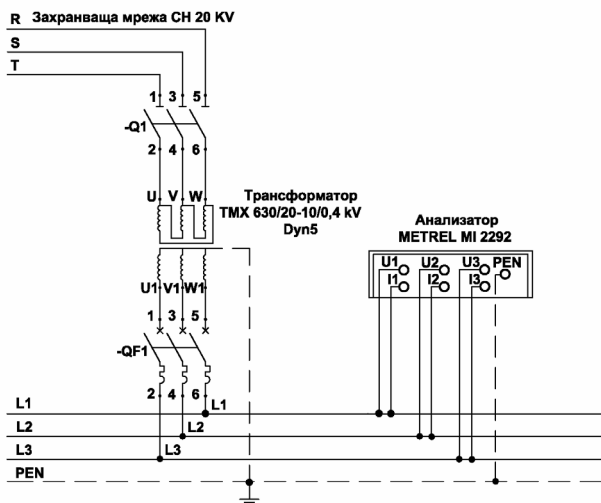
Тип на товара	К-фактор	Индекс на К-фактор, I_{LK}
Многопроводни електрически вериги в здравни заведения и училища, захранващи електронна апаратура и техника.	К-13	57.74
Тестови изпитвателни съоръжения, транспортни и технологични линии в индустрията	К-13	57.74
Сървъри, компютри и периферни устройства	К-20	80.94
Електрозадвижвания с регулиране на скоростта	К-20	80.94
Операционни блокове	К-20	80.94
Многопроводни електрически вериги в индустрията и лаборатории	К-30	123.54
Многопроводни електрически вериги в търговията	К-30	123.54
Други нелинейни товари с високи нива на хармониците	К-40	208.17

Резултати от изследванията

Проведените изследвания са на силов трансформатор, захранващ първата държавна сграда с фотоволтаична фасада в България – административна сграда в гр. Габрово - бивш Научно-технически съюз. Сградата е строена преди близо 40 години, като през 2014 г. е завършена рехабилитация и реконструкция с продължителност 2 години, като този проект на Областна администрация – Габрово е одобрен и финансиран от Националния доверителен екофонд на стойност близо 1 милион лв. Дейностите включват: смяна на дограма; основен ремонт на покривите с подмяна на топло- и хидроизолация; външна изолация на стени с минерална вата и покритие от алуминиев композит; изграждане на нова отоплителна система, както и осветителна и електрическа инсталации. Това е първата административна държавна сграда с поставени вертикални фотоволтаици, предвидени да произвеждат 23000 kWh електроенергия годишно. Панелите са монтирани на три от фасадите на сградата, като произвежданата електроенергия е предвидено да бъде използвана само за част от нуждите на сградата. За сметка на електроразпределителното дружество е сменен силовия трансформатор преди 10 години, като към ниската страна освен сградата на НТС са присъединени и битови потребители. Действащият в момента силов трансформатор е тип ТМХ 630/20-10/0,4 kV, $u_k\% = 4.39\%$, Ду_N5, IP 54, система на охлаждане ONAN. Отчитането на консумираната енергия е двутарифно, на страна ниско напрежение.

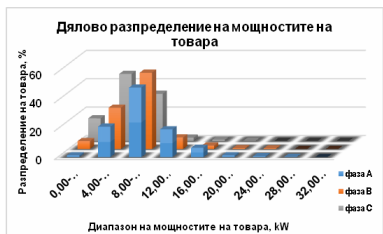
Проектно заложената инсталирана мощност на сградата е

$P_{инст.Σ} = 342kW$ с коефициент на едновременност $K_e = 0.8$. Действителната разчетна мощност е $P_p = 273.6kW$. За измерване на електрическите величини е използван анализатор на качеството на електрическа енергия METREL MI 2292, фиг. 2, (който е цифрово портативно мултифункционално устройство за измерване и анализ на трифазни електрически вериги), като наблюдаемият период е 48 часа, с отчитане на всеки 15 минути. За всяка фаза се наблюдават мощност, консумирана енергия, хармоничен профил на тока и напрежението до $\mathcal{S} = 29$ и $\cos\varphi$.



Фиг. 2. Принципно схема при провеждане на измерванията.

За наблюдавания период дяловото разпределение на товара по мощности е представено на фиг. 3 и фиг. 4.

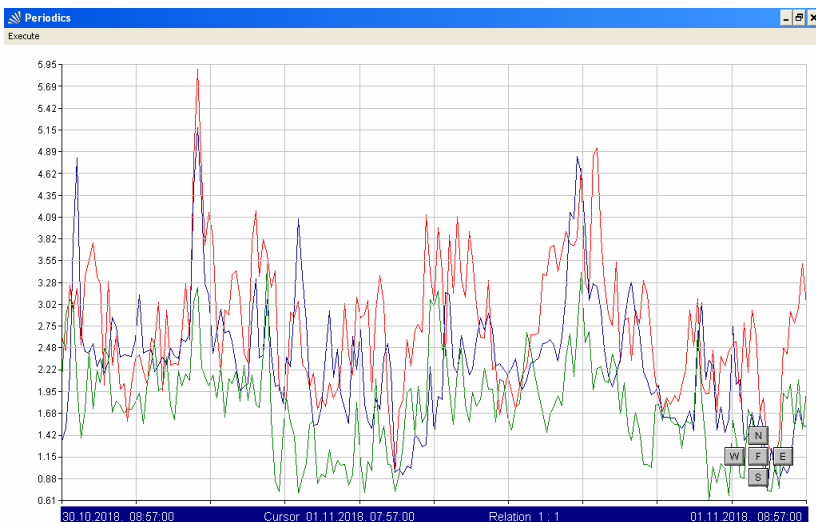


Фиг. 3.

P1+ (kW)	P2+ (kW)	P3+ (kW)			
0,00 - 4,00	1,22%	0,00 - 4,00	5,16%	0,00 - 4,00	15,98%
4,00 - 8,00	21,52%	4,00 - 8,00	29,17%	4,00 - 8,00	47,35%
8,00 - 12,00	49,08%	8,00 - 12,00	53,88%	8,00 - 12,00	33,30%
12,00 - 16,00	19,60%	12,00 - 16,00	8,17%	12,00 - 16,00	2,33%
16,00 - 20,00	6,56%	16,00 - 20,00	2,45%	16,00 - 20,00	0,92%
20,00 - 24,00	1,24%	20,00 - 24,00	0,63%	20,00 - 24,00	0,11%
24,00 - 28,00	0,64%	24,00 - 28,00	0,51%	24,00 - 28,00	0,01%
28,00 - 32,00	0,12%	28,00 - 32,00	0,02%		
32,00 - 36,00	0,01%				

Фиг. 4.

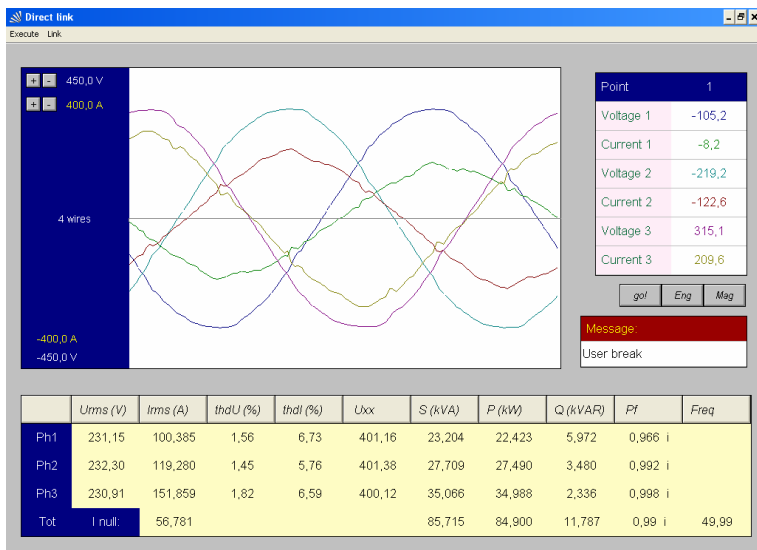
За консуматорите в сградата разпределението на активните мощности по фази е неравномерно. Средните стойности са както следва: фаза А – 21.743 kW; фаза В – 19.09 kW и фаза С – 16.944 kW. Това обяснява и разликата в консумираната активна електрическа енергия по фази, фиг. 5: за фаза А – 528.56 kWh; за фаза В – 443.52 kWh и за фаза С – 341.15 kWh.



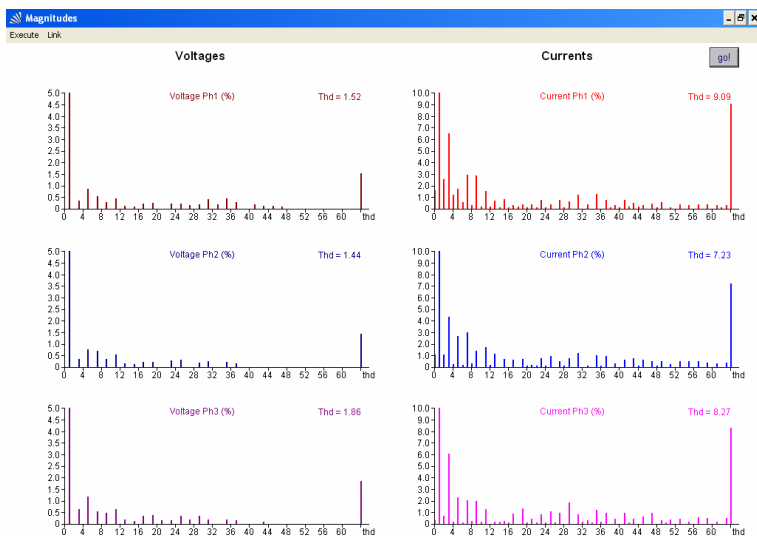
Фиг. 5. Консумирана активна енергия за трите фази.

Консуматорите в сградата се явяват съчетан нелинеен товар за трансформатора. Според Табл. 1 и инсталираните мощности разделението е както следва: осветление – 32 kW инсталирана мощност, К-4; UPS без входни филтри – инсталирана мощност 2 kW, К-13; сървъри, компютри и периферни устройства с обща инсталирана мощност 121,75 kW, К-20. Няма данни за характера на товара от страна на битовите потребители, присъединени към отделните фази.

Очевидно е разнообразието на товара и като бъдещо развитие на изследванията предстои по-задълбочен анализ на състоянието, вследствие увеличеното хармонично изкривяване и възможните вредни резонансни явления, фиг. 6 и фиг. 7.



Фиг. 6. Моментни стойности на наблюдаваните величини.



Фиг. 7. Моментни стойности на хармониците на напрежението и тока за трите фази.

Заклучение

Над 70% от товара на ЕСС е нелинеен и това показва значимостта на проблема с влиянието на хармониците. Все повече в индустрията и обществения сектор разнотипни нелинейни товари се захранват от един трансформатор. Друг съществен фактор е множеството грешки при отчитане на енергията в случаите на несинусоидални товари. Възможни са преотчитане или недоотчитане на консумираната енергия. Практиката показва, че най-голямо влияние на това оказват от 5-ти до 13-ти хармоник. Висшите хармоници на тока, прониквайки в ЕСС/мрежа влошават работата на високочестотните връзки и системи на автоматиката, предизвикват лъжливи сработвания на релейни защиты.

Изследването има научно-приложна насоченост. Получените резултати могат да се използват освен за анализ и за намиране на подходящо разпределение на комбинирани нелинейни товари с оглед енергийно ефективната и надеждна работа на захранващия трансформатор.

Основните резултати се свеждат до оценка на хармоничния състав на тока, дяловото разпределение на консумираната енергия от отделните нелинейни товари и последващ анализ на неблагоприятното влияние на хармониците на тока с изявен характер върху работата на захранващия трансформатор.

Литература

[1] The Institute of Electrical and Electronic Engineers, "Recommended Practice for Establishing Transformer Capabilities when Supplying Non-sinusoidal Load Currents" ANSI/IEEE C57.110, 1986.

[2] Deshpande K., R. Holmukhe, Y. Angal. *K-Factor Transformers and Non-linear Loads*. EDI, June 1991, Vol 2, No 6.

[3] Zobba A. F., *Practical Solutions for Harmonics Problems Produced in the Distribution Networks*, Journal of Electrical Systems, 2006, Vol. 2, No 1, p.p. 13-28.

[4] Gouda O.E., G.M. Amer, W. A. A. Salem. *A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation*, ETASR – Engineering, Technology and Applied Science Research, 2011, Vol. 1, № 5, p.p. 114-120.

[5] Harlov N. N. *Electro-Magnetic Compatibility in Energetics*. Publishing House TPU, 2009. (in Russian).

[6] Tsitsikyan G. N. *Electro-Magnetic Compatibility in Energetics*. Sankt-Peterburg, 2006. (in Russian).

[7] <https://www.ge.com/research/>

[8] <https://www.emerson.com>

Автори

гл. ас. д-р инж. Димитрина Йорданова Коева, Технически университет – Габрово, +359877168949, e-mail: dkoeva@abv.bg

доц. д-р инж. Свилен Радославов Рачев, Технически университет – Габрово, +359877168793, e-mail: sratchev@mail.com

гл. ас. д-р инж. Любомир Диянов Димитров, Технически университет – Габрово, +359886773234, e-mail: eng.l.dimitrov@abv.bg