

Wskaźniki jakości dostawy energii elektrycznej w sieci zasilającej elektrofiltry przemysłowe – analiza przypadku

Streszczenie. Pracujące w sieci przemysłowej elektrofiltry - jako urządzenia energoelektroniczne o regulowanej wartości napięcia i prądu niekorzystnie wpływają na parametry użytkowanej energii elektrycznej. Praca tego rodzaju urządzeń powoduje występowanie w sieci zasilającej asymetrycznych, szybkozmiennych i odkształconych prądów. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i analizę charakterystyk pracy elektrofiltra w systemie zasilania potrzeb własnych elektrociepłowni oraz omówiono wskaźniki jakości dostawy energii elektrycznej.

Abstract. Electrostatic precipitators in industrial networks are power electronics devices with controlled voltages and currents that adversely affect the network power quality indices. The precipitator operation causes asymmetric, rapidly fluctuated and distorted currents in the supplying electrical network. This paper describes measurement results and operation characteristics of a precipitator operation in network of power plant auxiliaries as well as power quality indices are considered. (Power quality indices in the industrial network supplying electrostatic precipitators – case study).

Słowa kluczowe: elektrofiltr, straty mocy, jakość dostawy energii elektrycznej

Keywords: Electrostatic precipitator, power losses, power quality

doi:10.12915/pe.2014.04.19

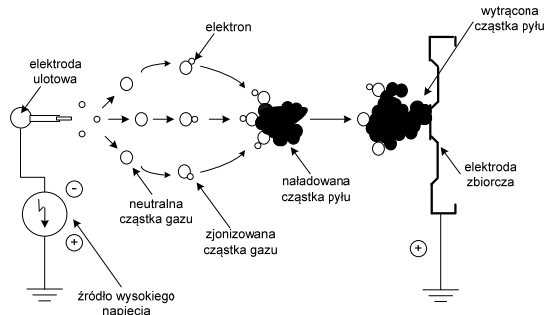
Wprowadzenie

Liczba odbiorników nieliniowych instalowanych w systemie elektroenergetycznym szybko rośnie. Obserwuje się trend coraz powszechniejszego stosowania przekształtników energoelektronicznych w układach napędowych w przemyśle, w gospodarstwach domowych, wymianę klasycznych źródeł oświetlenia na energooszczędne z układami elektronicznymi, a także ciągły wzrost zastosowań sprzętu informatycznego. Odbiorniki o nieliniowych charakterystykach prądowo-napięciowych często cechują się też asymetrycznym i szybkozmiennym poborem mocy. Jednym ze skutków ich obecności jest generacja dodatkowych strat w torze zasilania, m.in. w transformatorach. W tym przypadku wzrost strat wiąże się ze wzrostem temperatury roboczej elementów konstrukcyjnych, co z kolei prowadzi do pogorszenia stanu izolacji i skrócenia czasu eksploatacji transformatora. Sytuacja ta sprawia, że już na etapie doboru mocy transformatora rozważa się zmniejszenie jego obciążenia z tytułu odkształconych napięć i prądów.

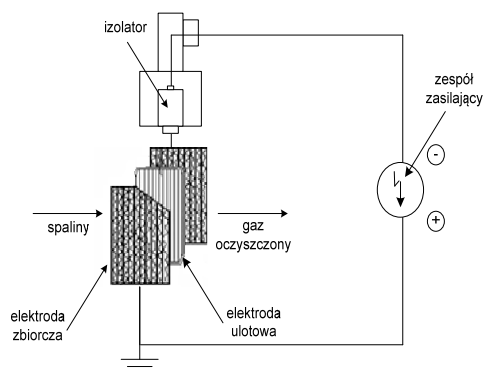
W procesie technologicznym elektrociepłowni i elektrowni ciepłych szeroko wykorzystywane są elektryczne urządzenia do odpylania spalin wychodzących z komina paleniska kotła opalanego pyłem węglowym (elektrofiltry). W hutach odpyła się np. gazy odlotowe powstające w procesie spiekania surowców, a przy produkcji miedzi z kruszców siarczkowych gaz z procesu przetwarzania rudy, zawierający dwutlenek siarki, kierowany jest następnie do produkcji kwasu siarkowego. W koksowniach elektrofiltry znalazły zastosowanie do odpylania i odszmalania surowego gazu koksowniczego. Bywają też stosowane do odpylania gazów odlotowych z pieców obrotowych w cementowniach.

W systemie zasilania potrzeb własnych, elektrofiltry zwane także odpylacami elektrostatycznymi, to urządzenia wykorzystujące działanie sił pola elektrycznego. Proces usuwania cząsteczek pyłu – odpylanie, odbywa się w przestrzeni między elektrodami (zbiorczymi), przez którą z małą prędkością przepływa strumień odpylanego gazu. Cząstki pyłu, po wprowadzeniu do komory, są ładowane elektrycznie przez przejmowanie ładunku od zjonizowanych jednoimiennie cząsteczek gazu. Następnie osadzane są na powierzchni elektrod zbiorczych, gdzie następuje koagulacja pyłu w warstwę, która w czasie strzepywania odrywa się od elektrody zbiorczej i wpada do leja

zsywowego (Rys.1). Proces jonizacji gazu następuje w wyniku wyładowania ulotowego na elektrodach ulotowych. Między elektrodami elektrofiltra wytwarzane jest niejednorodne pole elektryczne o dużym natężeniu. Aby proces odpylania zachodził efektywnie, wymagana jest duża skuteczność oddziaływania pola, a więc konieczne jest zapewnienie odpowiednio wysokiego napięcia.



Rys.1. Proces ładowania i wydzielania cząsteczek ulotowych w polu elektrycznym elektrofiltra



Rys.2. Schemat zasilania elektrod ulotowych

Elektrody ujemne (emisyjne, ulotowe) budowane są w postaci cienkich prętów. Z kolei elektrody dodatnie (zbiorcze) stanowią uziemione płyty. Najpowszechniej stosowanym układem jest szereg jednakowo oddalonych od siebie, równoległych płyt między którymi umieszczone są rzędy cienkich prętów (Rys.2).

Prawidłowe odpylanie spalin wychodzących z komina wymaga, aby elektrofiltr zasilany był wysokim napięciem, którego wartość jest bezpośrednio zależna od przestrzeni między elektrodą ulotową i zbiorczą. Wartość napięcia granicznego ulega ciągłym zmianom w czasie, na skutek modyfikacji parametrów fizycznych i chemicznych mieszanki gazu wylotowego. Na podstawie wartości napięcia określa się stan pracy odpylacza elektrostatycznego.

Opis obiektu

Parametry stanu pracy elektrofiltru

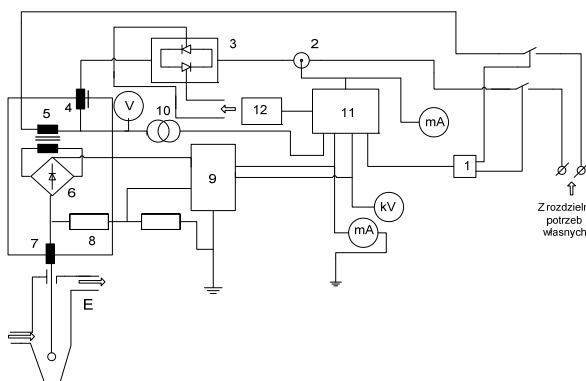
Dla zespołów elektrofiltrów odpylających spaliny z kotłów parowych typu TP230 w elektrociepłowni przemysłowej w której wykonano pomiary, przyjmuje się następującą gradację napięć:

$U > 40$ kV – bardzo dobra praca filtru,
 34 kV $< U < 40$ kV – dobra praca filtru,
 20 kV $< U < 34$ kV – zmniejszona skuteczność pracy filtru,
 $U < 20$ kV – zła praca filtru.

Maksymalna wydajność kotła energetycznego wynosi 230 t/h pary i jest on przystosowany do równoczesnego spalania pyłu węglowego, gazu wielkopieczowego oraz gazu koksowniczego. W chwili obniżenia napięcia poniżej 34 kV i prądu ulotu poniżej 50mA, następuje samoczynne wyłączenie zespołu. Przekroczenie dopuszczalnej wartości napięcia wynikającej z warunków (atmosfery) pomiędzy elektrodami, powoduje przebicie obszaru między elektrodami, skutkiem czego jest przeskok iskrowy – zwarcie o charakterze przemijającym lub wytworzony zostaje łuk elektryczny, a więc powstaje zwarcie trwałe. Optymalna częstotliwość przeskoków w komorze elektrofiltru oraz towarzyszące im zaniki napięcia między elektrodami, powinny zawierać się w przedziale (30...80) przeskoków/min. Praktyczna ocena pracy zespołu przyjmuje 3 kategorie:

A – niska częstotliwość i brak przeskoków (poniżej jednego przeskoku w czasie 2 sekund),
 B – normalna częstotliwość pracy (od 0,5 do 1,5 przeskoku w czasie 1 sekundy),
 C – duża częstotliwość przeskoków (powyżej 1,5 przeskoku w czasie 1 sekundy).

Dla zespołów zasilających, częstotliwość wylądowań może być dowolnie mniejsza od podanych powyżej, ale warunkiem jest, aby utrzymać graniczną wartość napięcia i prądu obciążenia zbliżoną do wartości znamionowych.



- | | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 1. stycznik | 7. dławik wysokiej częstotliwości |
| 2. przetężniczkę | 8. dzielnik wysokiego napięcia |
| 3. moduł tyrystorowy | 9. przetwornik pomiarowy |
| 4. dławik | 10. transformator pomiarowy |
| 5. transformator WN | 11. regulator napięcia |
| 6. prostownik diodowy | 12. układ sterowania tyrystorów |

Rys.3. Schemat blokowy sterowania pojedynczym zespołem przekształtnikowym elektrofiltru

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy sterowania pojedynczym zespołem przekształtnikowym elektrofiltru. Zadaniem układu zasilającego jest podnoszenie napięcia do chwili wytworzenia przeskoku łukowego. Następuje jego detekcja, w efekcie czego przepływ prądu elektrofiltru zostaje zablokowany na czas procesu dejonizacji komory. Układ sterowania elektrofiltru zapewnia ciągłą pracę układu zasilającego zgodnie z algorytmem pracy elektrofiltru. Regulator napięcia (11) współpracuje z układem sterowania tyrystorów (12) w celu regulacji wartości wyprostowanego napięcia wyjściowego. Przetwornik pomiarowy (9) zapewnia separację galwaniczną obwodów sterowania i wysokonapięciowego. Tak wypracowany przebieg podawany jest na transformator wysokiego napięcia elektrofiltru. Napięcie robocze strony górnej transformatora w zakresie zmian od 88...100 kV po wyprostowaniu podawane jest przez dławik wysokiej częstotliwości na elektrody elektrofiltru i wywołuje w obwodzie WN transformatora prąd w zakresie zmian 1000...1200 mA.

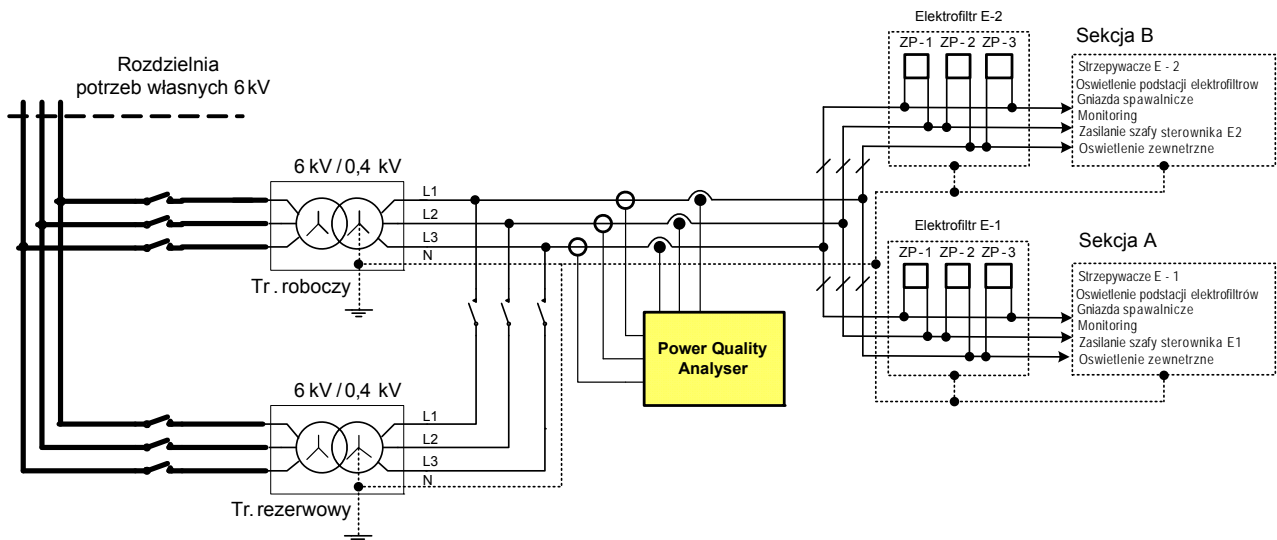
Układ połączeń podstacji oraz obwód pomiarowy

Na Rys. 4 przedstawiono schemat ideowy układu zasilania elektrofiltrów. Zespoły robocze rozważanego elektrofiltru zasilane są z transformatora o następujących parametrach katalogowych:

Moc znamionowa	S_{nom}	kVA	1000
Napięcie znamionowe strony pierwotnej	U_{1nom}	V	6300
Napięcie znamionowe strony wtórnej	U_{2nom}	V	400
Znamionowy prąd strony pierwotnej	I_{1nom}	A	91,5
Znamionowy prąd strony wtórnej,	I_{2nom}	A	1443
Napięcie zwarcia	U_{zw}	%	6,12
Straty mocy biegu jałowego	ΔP_0	kW	2,12
Straty mocy w stanie zwarcia	ΔP_{zw}	kW	11,06
Rezystancja zastępcza uzwojenia pierwotnego	R_1	Ω	0,16760
Rezystancja zastępcza uzwojenia wtórnego	R_2	Ω	0,00057
Grupa połączeń			Yy0

Transformator z chłodzeniem olejowym zasilany jest kablem AKFt z rozdzielni potrzeb własnych 6 kV elektrociepłowni przemysłowej i umieszczony w specjalnie wentylowanej komorze. Układ sieciowy jaki tworzą jednostka robocza, elektrofiltry oraz pozostałe odbiory trójfazowe wykonany został w konfiguracji TN-C (Rys. 4). W całym układzie sieci funkcje przewodu ochronnego PE, funkcje przewodu neutralnego N pełni także jeden przewód ochronno-neutralny PEN. Jednostki prostownicze poszczególnych elektrofiltrów zasilane są z uzwojenia wtórnego napięcia transformatora roboczego.

Elektrofiltry E-1 i E-2 zasilane są bezpośrednio z podstacji, w której sekcje A i B rozdzielni niskiego napięcia są rozdzielone poprzez odłączniki i zasilane z transformatora roboczego. W przypadku wystąpienia awarii lub przeprowadzania prac konserwacyjnych wynikających z harmonogramu przeglądów, zespoły elektrofiltrów są zasilone przez transformator rezerwy o tych samych parametrach znamionowych, co transformator roboczy. Pomiar wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej transformatora roboczego, na podstacji zasilającej zespoły elektrofiltrów. Do pomiarów wykorzystano miernik firmy Topas 1000 Power Quality Analyser. Z rozdzielni niskiego napięcia 0,4 kV zasilane są m.in.: szafy i zespoły sterownicze, strzepywacze elektrod, urządzenia technologiczne, oświetlenie warsztatu elektrycznego, oświetlenie podstacji, kominów budynku elektrofiltrów oraz gniazda spawalnicze podstacji.

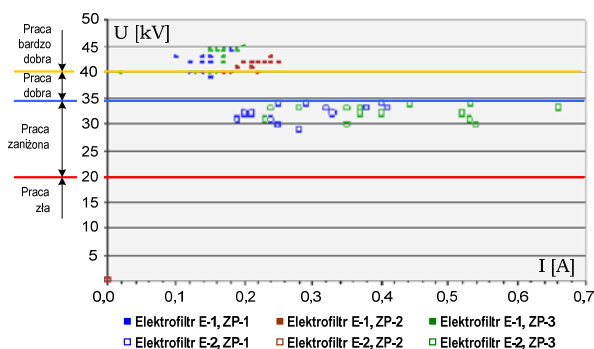


Rys.4. Układ zasilania elektrofiltrów i punkt pomiaru wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej

Pomiar parametrów stanu pracy elektrofiltrów i sieci zasilającej

Ocena pracy jednostek odpylających

Podczas wykonywania pomiarów wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej w systemie zasilania elektrociepłowni przemysłowej pracowały dwie jednostki odpylające spaliny z kotłów parowych. Wykonano rejestracje pracy każdego z odpylaczy elektrostatycznych. Określono stan pracy poszczególnych zespołów prostowniczych typu PiKT o maksymalnych prądach ulotu: elektrofiltr E-1, ZP1 – 800 mA, ZP2 - ZP3 -1200 mA; elektrofiltr E-2: ZP1- ZP3 – 1000 mA. Na podstawie odczytywanych cyklicznie wartości napięcia i prądu zespołu przeprowadzono ocenę skuteczności odpylania danej jednostki, wykorzystując w tym celu zamieszczoną wcześniej gradację wartości napięcia pracy urządzenia. Na podstawie charakteru i trendu zmian parametrów w komorze gazowej elektrofiltru, a także porównania pracy poszczególnych zespołów prostowniczych ze sobą, wyznaczono charakterystykę pracy danego odpylacza elektrostatycznego (Rys. 5).



Rys.5. Charakterystyka pracy dwóch odpylaczy elektrostatycznych

Zarejestrowana charakterystyka parametrów stanu pracy filtrów informuje o poprawnej pracy wszystkich zespołów prostowniczych elektrofiltru E-1. Nie zaobserwowano zwarcia żadnej komory, a wysokie poziomy napięcia zgodnie z gradacją ($U > 40$ kV) wskazują na bardzo dobrą pracę odpylacza. Z kolei w przypadku elektrofiltru E-2, zespół prostowniczy nr 3 pozostaje wyłączony przez cały czas trwania pomiarów na skutek zwarcia komory. Praca odpylacza odbywa się w warunkach zaniżonych ($U = 20...34$ kV), czego skutkiem jest

zmniejszenie skuteczności oczyszczania gazów wylotowych.

Parametry stanu pracy sieci zasilającej

Elektrofiltry należą do jednych z wielu odbiorów niespokojnych zainstalowanych w sieciach przemysłowych. Zasilane są ze specjalnych jednostek transformatorowych, często przewymiarowanych, ich moc jest wyznaczana z uwzględnieniem: zwarciowego (udarowego) charakteru prądów występujących podczas normalnej pracy elektrofiltru, liczby zasilanych zespołów elektrofiltrów oraz ich mocy maksymalnych. W przypadku tych jednostek podczas projektowania zakłada się (30-40)% zapasu mocy ze względu na przetężenia mogące powstać w obwodzie podczas łączeń ruchowych, jak również pracy jednostki z innymi odbiornikami, w tym również nie zainstalowanymi na stałe w obwodzie np. elektryczne zespoły spawalnicze. W chwili przeprowadzania pomiarów, obciążenie transformatora stanowiły jedynie wskazane na rysunku 4 dwa elektrofiltry oraz niewielkie odbiory trójfazowe. Tak więc jednostka o mocy $S_n=1000$ kVA została zaprojektowana do zasilania czterech elektrofiltrów, po dwa na poszczególną sekcję.

Maksymalne, przewidywane szczytowe obciążenie prądowe sekcji A w przypadku pracujących wszystkich zespołów elektrofiltru wraz ze strzeżycaczami, grupą szaf sterowniczych oraz załączonym oświetleniem wynosi około 814 A, z czego 77 % obciążenia transformatora stanowią zespoły prostownicze.

Dla sekcji B podczas pracy odpylacza elektrostatycznego, strzeżycacze elektrod i zespołów spawalniczych obciążenie wynosi około 560 A, z czego aż 88% stanowią jednostki prostownicze. Pobór mocy przez obwody oświetlenia przemysłowego (lampy wyładowcze) wynosi około 11 % mocy obciążenia transformatora dla sekcji A oraz jedynie 2 % mocy jednostki dla sekcji B.

Przeprowadzona podczas pomiarów rejestracja mocy poszczególnych faz strony wtórnej, wykazała mały stopień obciążenia transformatora - poniżej obciążenia znamionowego. Występujący stan spowodowany jest pracą dwóch odpylaczy elektrostatycznych oraz niepełnym obciążeniem poszczególnych sekcji. Maksymalne wartości mocy poszczególnych faz jednostki, zarejestrowane w czasie pięciodniowego pomiaru zamieszczono w Tabeli 1.

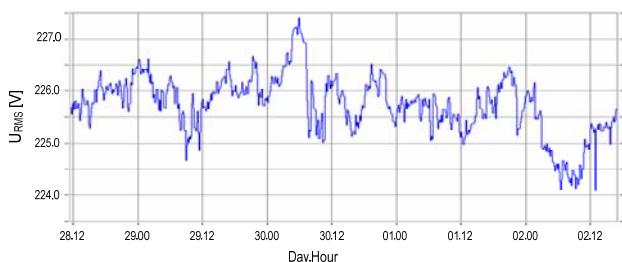
Tabela 1. Wartości obciążenia maksymalnego poszczególnych faz transformatora roboczego

Wielkość	Faza L-1	Faza L-2	Faza L-3
P [kW]	53,07	75,35	62,98
Q [kVAR]	27,48	30,59	6,95
S_{sr} [kVA]	61,60	86,39	69,00
$\sum S_{sr}$ [kVA]	215,00	$\sum S_{sr}$ [kVA]	215,00

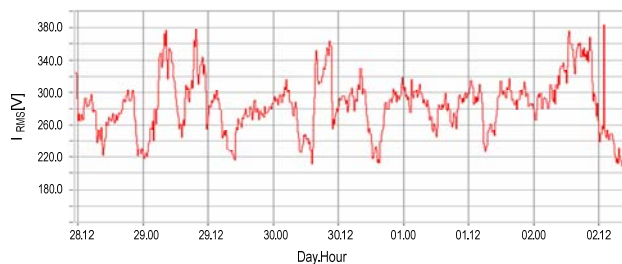
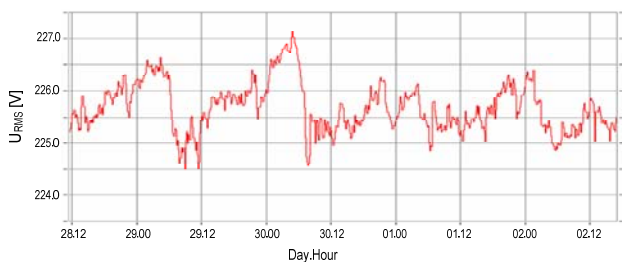
Pomiar oraz rejestracja podstawowych wielkości prądu i napięcia, pozwala określić warunki pracy transformatora trójfazowego podczas pracy z odpylaczem elektrostatycznym. Zmiany wartości skutecznych napięć i prądów strony wtórnej poszczególnych faz transformatora podczas pięciodniowej rejestracji przedstawiono na Rys. 6. Wartości chwilowe napięć i prądów strony wtórnej poszczególnych faz transformatora podczas maksymalnego obciążenia są widoczne na Rys. 7. Jak wynika z

zarejestrowanych przebiegów oraz topologii połączeń odbiorów trójfazowych, najbardziej obciążoną fazą transformatora roboczego jest faza L-2, przy występującej asymetrii prądowej. Zwarcie komory elektrofiltrowej E-2 oraz wyłączenie zespołu prostowniczego 3 powoduje zmniejszenie (odciążenie) wartości prądów fazy L-1 i L-3. Praca odpylacza elektrostatycznego jako obciążenia transformatora o stochastycznym charakterze zmian, uwidacznia się w przebiegach prądu fazowego w postaci losowo generowanych udarów prądu spowodowanych wyładowaniami występującymi w komorach odpylających.

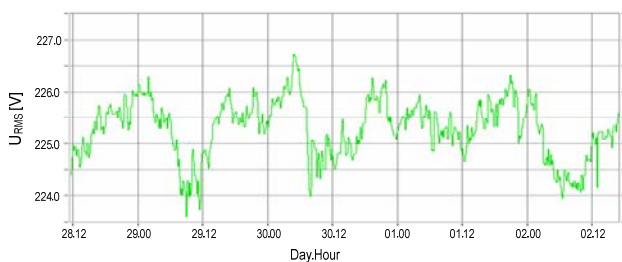
Wprowadza to znaczącą zmianę asymetrii prądowej, wskutek zachodzących wyładowań w każdej fazie, wynikających z aktualnego składu odpylanej mieszanki gazu. Zmienny w sposób losowy charakter pracy odpylacza powoduje również powstawanie znacznych wahań napięcia we wszystkich trzech fazach układu.



Faza L-1

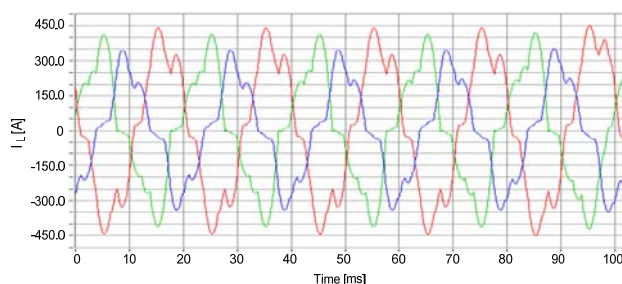
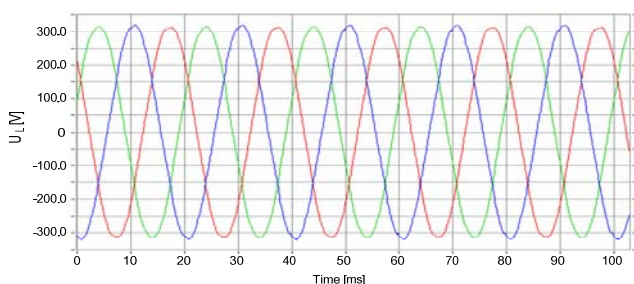


Faza L-2



Faza L-3

Rys. 6. Wartości skuteczne napięć (a) i prądów (b) strony wtórnej transformatora

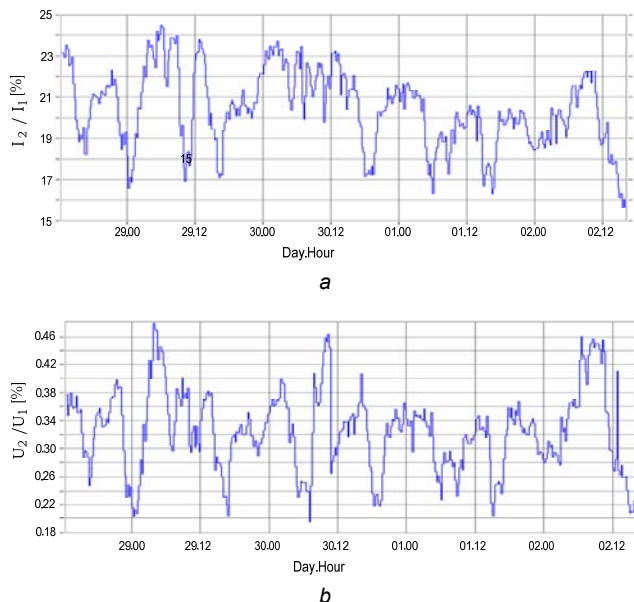


Rys. 7. Wartości chwilowe napięć (a) i prądów (b) strony wtórnej transformatora

Charakterystyka wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej

Asymetria napięcia i prądu

Praca dwóch jednostek odpylających wprowadza znaczną asymetrię prądu strony wtórnej transformatora roboczego. W czasie pomiarów współczynnik asymetrii prądu zawarty jest w przedziale 16,5...24,5 %, a jego średnia wartość wynosi około 20 % (Rys. 8a).



Rys.8. Zmiana współczynnika asymetrii (a) prądu (b) napięcia

Ponieważ obciążenie transformatora podczas rejestracji nie przekracza 25% obciążenia znamionowego, asymetria napięcia w sieci 0,4kV nie przekracza wartości 0,5%, co zgodnie z normą PN-EN 50160:2011 jest poziomem akceptowalnym (Rys. 8b).

Harmoniczne prądu oraz napięcia

Na Rys. 9a i 9b przedstawiono analizę harmonicznym zarejestrowanych przebiegów napięcia oraz prądu strony wtórnej transformatora roboczego przy maksymalnym obciążeniu.

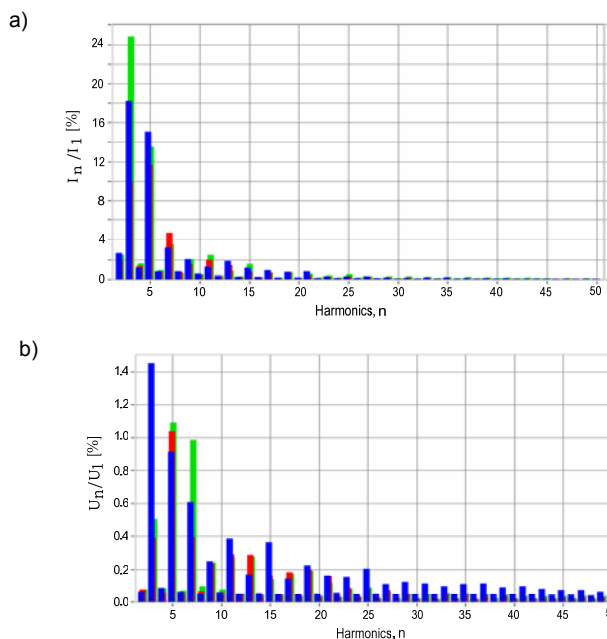
Widoczne są dominujące, typowe (charakterystyczne) harmoniczne tj. 3, 5, 7, 11, 13 i 15, lecz także nietypowe składowe parzystych - 2, 4 oraz nieparzystych rzędów - 17, 19, 21, 23 i 25. Jest to skutek asymetrii nieliniowego obciążenia transformatora.

W Tabeli 2 podano dodatkowo wartości całkowitego współczynnika odkształcenia poszczególnych faz napięcia i prądu.

Tabela 2. Całkowity współczynnik odkształcenia prądu i napięcia

Wielkość	U			I		
	L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3
THD [%]	2,00	1,50	1,75	22,36	9,96	40,13

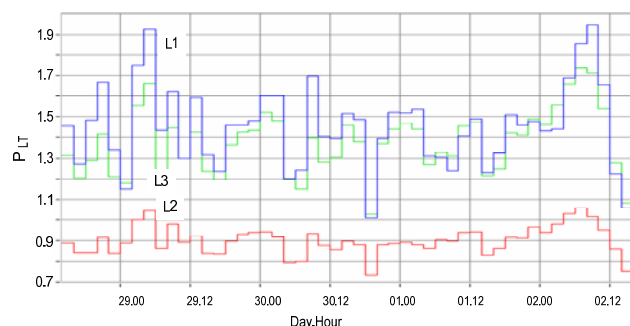
Analizując wartości poszczególnych harmonicznym i współczynników THD oraz porównując je z poziomami granicznymi podanymi w normach PN-EN 50160:2011 i CEI/IEC61000-2-4:2002 można stwierdzić, że z punktu widzenia odkształcenia warunki dostawy energii są poprawne. Istotnym czynnikiem w analizowanym przypadku jest relatywnie mała wartość sumarycznego obciążenia transformatora.



Rys.9. Harmoniczne (a) prądu i (b) napięcia strony wtórnej transformatora

Wskaźnik migotania napięcia

Powstałe w czasie trwania pomiaru, na skutek losowej pracy elektrofiltrów wahania napięcia poszczególnych faz układu (Tab.3), przekraczają dopuszczalne poziomy wskaźnika długookresowego migotania światła P_{LT} (zgodnie z normami: PN-EN 50160:2011, CEI/IEC61000-2-4:2002). Obserwowana różnica zachodząca w maksymalnych wartościach wskaźnika spowodowana jest jakością pracy poszczególnych zespołów prostowniczych elektrofiltrów. Na skutek dużej skuteczności odpylania oraz dużej liczby wyładowań zachodzących w komorach, poziom wahań napięcia jest wysoki. Skutkiem jest obserwowane migotanie strumienia świetlnego źródeł światła zainstalowanych w analizowanej sieci przemysłowej, w całym okresie prowadzonych pomiarów. Charakterystykę zmian długookresowego wskaźnika wahań napięcia P_{LT} przedstawiono na Rys. 10 .



Rys.10. Charakterystyka zmian długookresowego wskaźnika wahań napięcia

Tabela 3. Wartości długookresowego wskaźnika wahań napięcia

Wielkość	P_{LT}		
	L-1	L-2	L-3
Faza			
CP95	1,85	1,03	1,66
Max	1,95	1,06	1,73

Ocena warunków pracy transformatora

Przy ocenie pracy transformatora w warunkach nieliniowego obciążenia niezbędna jest procedura analizy wpływu wyższych harmonicznych prądu na poziom strat w jego uzwojeniach. Jednostka przewidziana do współpracy z obciążeniem nieliniowym, powodującym przepływ prądów odkształconych w uzwojeniach transformatora, musi uwzględniać występowanie dodatkowych strat w ogólnym bilansie mocy. Znając rodzaj obciążenia, moc oraz przypisany (obliczony) dla danego typu urządzeń współczynnik dodatkowych strat, można dobrać moc transformatora, odpowiednią do warunków pracy z obciążeniem generującym dodatkowe straty.

Całkowite straty w transformatorze można podzielić na straty obciążeniowe oraz straty biegu jałowego (straty w rdzeniu):

$$(1) \quad \Delta P_T = \Delta P_{LL} + \Delta P_C$$

gdzie: ΔP_T – straty całkowite, ΔP_{LL} – straty obciążeniowe, ΔP_C – straty biegu jałowego (straty w rdzeniu).

W ogólnym bilansie strat w transformatorze wartość strat ΔP_C wytwarzanych podczas magnesowania rdzenia strumieniem waha się w przedziale między 10 % a 20 %. Na straty obciążeniowe ΔP_{LL} składają się straty wywołane przepływem prądu przez uzwojenia transformatora, tzw. straty „zwojowe” ΔP_{Cu} , oraz straty od prądów wirowych w uzwojeniach i innych częściach metalowych transformatora:

$$(2) \quad \Delta P_{LL} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{EC} + \Delta P_{OSL}$$

gdzie: $\Delta P_{Cu} = I^2 R$ – straty „zwojowe”, R, I – rezystancja uzwojeń i wartość skuteczna prądu transformatora, ΔP_{EC} – straty od prądów wirowych w uzwojeniach, ΔP_{OSL} – straty dodatkowe od prądów wirowych w częściach metalowych, kadzi itp.

Zdefiniowaną w ten sposób wartość strat wiropędowych ΔP_{EC} oraz strat dodatkowych ΔP_{OSL} dla niesinusoidalnego prądu obciążenia szacuje się od 20% do 30% wartości całkowitych strat obciążenia ΔP_{LL} transformatora. Zakłada się, że straty wywołane przepływem prądów wirowych stanowią od 7 % do 10 % strat całkowitych. Z kolei w przypadku rozdzielania strat wiropędowych między uzwojenia pierwotne i wtórne transformatora, rolę znaczącą odgrywa przekładnia. Dla jednostek o przekładni do 4:1 przyjmuje się podział: 40 % strat uzwojenie pierwotne oraz 60% strat uzwojenie wtórne, z kolei dla transformatorów o przekładni większej niż wspomniana oraz mających więcej niż jedno uzwojenie o prądzie większym niż 1000 A wprowadza się proporcje: 30 % na straty w uzwojeniu pierwotnym oraz 70% na straty w uzwojeniu wtórnym [9].

Jak wskazano powyżej, w badanych warunkach pracy rejestracja mocy poszczególnych faz strony wtórnej transformatora wykazała mały stopień obciążenia

transformatora w relacji do obciążenia znamionowego. Jest to spowodowane niepełnym obciążeniem poszczególnych sekcji. To naturalnie, prowadzi do obniżenia strat obciążeniowych transformatora. Określając wartości poszczególnych strat: obciążeniowych ΔP_{LL} , w rdzeniu ΔP_C oraz strat dodatkowych na podstawie danych znamionowych transformatora olejowego, wykonano bilans strat w zależności od rodzaju obciążenia strony wtórnej.

Wyznaczając straty w rdzeniu transformatora ΔP_C dla każdego przypadku obciążenia jednostki trójfazowej, przyjmuje się tę samą wartość ze względu na napięcie zasilające uzwojenia. Zakłada się, że straty wywołane przepływem prądów wirowych ΔP_{EC} oraz straty dodatkowe ΔP_{OSL} stanowią 30 % wartości strat obciążenia. W przypadku rozdzielania strat wiropędowych od dodatkowych przyjęto, że te pierwsze stanowią 10 % wyznaczonych strat. Określając straty poszczególnych uzwojeń transformatora, wykorzystano informację o przekładni jednostki. Przyjęto następujące proporcje: 30 % - straty w uzwojeniu pierwotnym oraz 70 % - straty w uzwojeniu wtórnym. Wartości poszczególnych strat dla rozważanego rodzaju obciążenia transformatora zamieszczono w Tabeli 4.

W przypadku porównania strat całkowitych transformatora pracującego z roboczym liniowym i symetrycznym obciążeniem (wyliczonym z zarejestrowanej mocy sumarycznej) oraz rzeczywistym nieliniowym i asymetrycznym obciążeniem stwierdzono zwiększenie strat sumarycznych. Jak wynika z danych z Tabeli 4, rodzaj obciążenia transformatora w obu przypadkach nie wpływa na zmianę wartości strat w miedzi P_{Cu} , wprowadza jednak dość znaczące różnice w stratach wiropędowych ΔP_{EC} i ΔP_{OSL} . Obliczone wartości strat transformatora dowodzą, że przepływ prądów odkształconych w przypadku zasilania odbiornika o charakterze nieliniowym wywołuje większe straty wiropędowe w ogólnym bilansie mocy. Porównując straty przy obciążeniu rzeczywistym i znamionowym można stwierdzić, że wpływ harmonicznych w badanych warunkach jest nieznaczny. Natomiast przy pracy transformatora z pełnym (projektowanym) obciążeniem dla danej sieci należy uwzględnić obecność wyższych harmonicznych związaną z rozważanym rodzajem obciążenia transformatora, co wywoła znaczący wzrost strat wiropędowych. Potwierdzają to obliczenia wartości współczynnika obniżenia dopuszczalnego obciążenia transformatora (K-Factor) [7]: dla danej sieci jest to wartość $K=4$. Wskazuje to na konieczność zmniejszenia dopuszczalnego obciążenia transformatora o 10%.

Tabela 4. Porównanie wartości strat mocy transformatora dla różnego rodzaju odbiorników

Rodzaj strat transformatora	Straty ΔP_{Cu} [kW]	Straty wiropędowe		Straty obciążeniowe ΔP_{LL} [kW]	Straty w rdzeniu ΔP_C [kW]	Straty sumaryczne ΔP_T [kW]
		w uzwojeniach ΔP_{EC} [kW]	dodatkowe ΔP_{OSL} [kW]			
Straty przy liniowym znamionowym obciążeniu	7,742	0,332	2,986	11,060	2,120	13,180
Straty przy roboczym liniowym obciążeniu	0,252	0,007	0,065	0,324	2,120	2,444
Straty przy rzeczywistym roboczym obciążeniu	0,252	0,018	0,084	0,354	2,120	2,474

Podsumowanie i wnioski

Pracujące w sieci przemysłowej elektrofiltry - jako urządzenia energoelektroniczne średniego napięcia o regulowanej wartości parametrów napięcia i prądu, niekorzystnie wpływają na parametry użytkowanej energii elektrycznej. Praca tych urządzeń powoduje obecność w sieci zasilającej asymetrycznych, szybkozmiennych i odkształcanych prądów. Staje się również przyczyną stopniowego ograniczania maksymalnej mocy pozornej innych obciążeń przyłączonych do transformatora.

Przeprowadzone pomiary wartości napięć, prądów oraz wyznaczone współczynniki określające jakość dostawy energii elektrycznej w badanej sieci zasilającej dowodzą, że obciążenie niesymetryczne wywołuje dużą asymetrię prądu w poszczególnych fazach układu. Wskutek zmniejszonego obciążenia ma to nieznaczny wpływ na asymetrię napięcia.

W badanym układzie powstaje całe spektrum harmonicznych prądu. Na skutek względnie dużej mocy transformatora, współczynnik zawartości harmonicznych napięcia spełnia warunki poprawnej jakości dostawy energii elektrycznej podane w normach PN-EN 50160:2011, CEI/IEC61000-2-4:2002 oraz w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z dnia 29 maja 2007 r.). Maksymalne wartości całkowitego współczynnika odkształcenia harmonicznych prądu THDI dochodzą do 44%.

Podczas pracy elektrofiltru występuje również znaczne (prawie dwukrotne) przekroczenie dopuszczalnej wartości wskaźnika wahań napięcia P_{LT} , co ma negatywny wpływ na źródła światła zasilane z rozważanego transformatora.

Biorąc pod uwagę rezultaty przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dobór układu sieci niskiego napięcia elektrociepłowni przemysłowej w której pracuje elektrofiltr oraz transformatora zasilającego powinien być dokonany z uwzględnieniem charakteru jego pracy.

Podziękowania:

Praca finansowana z badań statutowych AGH - 11.11.210.198 .

LITERATURA

- [1] Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej. Część 4. Wyższe harmoniczne napięć i prądów, http://twelvee.com.pl/pdf/Hanzelka/cz_4_pelna.pdf.
- [2] Holdyński G., Skibko Z.: Problemy związane z eksploatacją transformatorów energetycznych zasilających odbiorniki nieliniowe, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 5, 2010, 32-35.
- [3] Jezierski E.: Transformatory, WNT, Warszawa, 1983.
- [4] Jagieła K., Rak J., Gała M., Kępiński M.: Straty mocy w transformatorach energetycznych zasilających dużych odbiorców przemysłowych, *Elektroenergetyka*, 3, 9, 46-56.
- [5] Rak J., Gała M., Jagieła K., Kępiński M.: Analiza obciążenia i strat w transformatorach przekształtnikowych układów napędowych, *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne*, 89, 2011, Katowice, 139-147.
- [6] www.aet.com.sg, K-Factor Isolation Transformer, (AET-2009-AET_K13-Factor_400V_R1.pdf) [10.08.2011]
- [7] Desmet J., Delaere G.: Harmoniczne. Dopuszczalna obciążalność i dobór transformatorów do pracy z prądem odkształconym, Jakość zasilania – poradnik cz. 3.5.2, Polskie Centrum Promocji Miedzi, Wrocław 2005.
- [8] Pei Li, Guodong Li, Yonghai Xu, Shujun Yao: Methods Comparison and Simulation of Transformer Harmonic Losses, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific.
- [9] Linden W. Pierce: Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents, *IEEE Transactions on industry application*, 32, 3, May/June 1996.
- [10] Gregory W. Massey: Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers, *IEEE Transactions on industry application*, 30, 2, March/April 1994.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jurij Warecki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Podstawowych Problemów Energetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: jwarecki@agh.edu.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: hanzel@agh.edu.pl; mgr inż. Michał Gajdzica, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Podstawowych Problemów Energetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: michal.gajdzica@wp.pl.