

Wpływ charakteru obciążenia z zakładów przemysłowych na parametry jakościowe dostaw energii elektrycznej z linii WN/SN

Badania parametryczne

Kamil Kołodziej

Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-021 Rzeszów

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki pomiarów związane z analizą parametrów sieci energetycznej 110/6 kV zasilającej zakłady przemysłowe. Badań dokonano na trzech torach prądowych 6 kV po stronach wtórnych trzech transformatorów 110/6 kV zasilających trzy sekcje stacji GPZ o łącznej mocy 48 MVA. Dzięki przeprowadzonym pomiarom po stronach wtórnych trzech identycznych transformatorów 110/6 kV możliwe było porównanie wpływu charakteru obciążenia z poszczególnych zakładów na parametry jakościowe dostarczanej energii elektrycznej. Przedstawiono również wyniki pomiarów jakości energii elektrycznej zarejestrowane podczas ruchu sieciowego i czynności łączeniowych na torach prądowych 6 kV, a także statystykę zdarzeń. Artykuł kończą wnioski i podsumowanie z przedstawionych pomiarów.

Słowa kluczowe: GPZ 110/6 kV, jakość energii elektrycznej, analiza parametrów zasilania, zasilanie zakładów przemysłowych

1. Wprowadzenie

Artykuł stanowi drugą część opracowania zawierającego wprowadzenie teoretyczne [1]. Część ta, zawierająca wyniki praktycznych pomiarów stanowi praktyczne potwierdzenie omówionych w części 1 parametrów dotyczących energii elektrycznej oraz problematyki jej dostarczania do dużych zakładów przemysłowych.

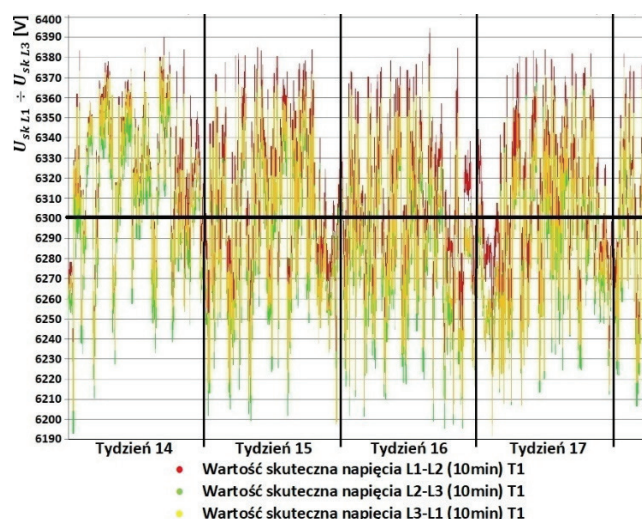
Przechodząc do analizy parametrów sieci po stronie wtórnej transformatorów T1, T2 i T3 dla danych torów prądowych dokonano analizy licznych parametrów energii elektrycznej. Dane pomiarowe zebrano w okresie 1.04.2019–30.04.2019 i 1.05.2019–31.05.2019. Ich wyniki zostały opracowane w formie tabel z danymi oraz wykresów. Dodatkowo wygenerowano statystyki z zarejestrowanych zdarzeń.

Rys. 1. Wykres wartości skutecznych napięć po stronie wtórnej transformatora T1
Fig. 1. Graph of effective voltage values on the secondary side of T1 transformer

2. Analiza parametrów sieci 6 kV

2.1. Wartości skuteczne napięć i ich odchylenia

Z dokładnej analizy przebiegu (rys. 1) wynika, że duży wpływ na poziom wartości napięcia ma pora dnia oraz dzień tygodnia. W ciągu dnia w wyniku zwiększonego obciążenia wartość napięcia spada. Minimalna zarejestrowana wartość w tym okresie wyniosła 6,19 kV, co stanowi spadek o 1,75% w stosunku do wartości 6,3 kV. Maksymalna wartość wyniosła natomiast 6,39 kV, co stanowi wzrost o 1,42%. Zmiany te są niewielkie w stosunku do dopuszczalnych poziomów



Autor korespondujący:

Kamil Kołodziej, kamil222pl@wp.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 28.09.2019 r., przyjęty do druku 28.05.2020 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

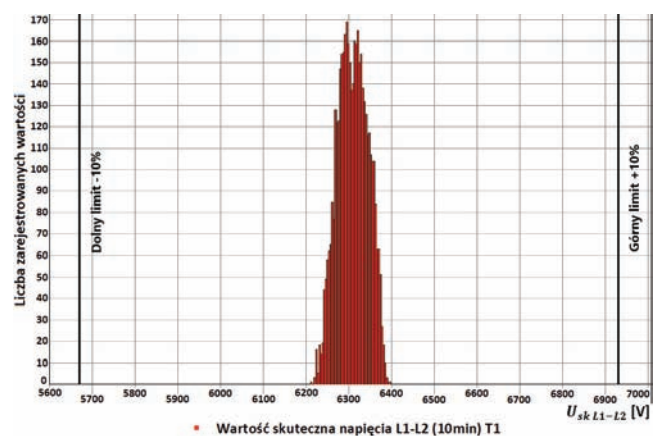
Tab. 1. Wartości napięć i ich odchylenia dla T1, T2 i T3
 Tab. 1. Voltage values and their deviations for T1, T2 and T3

T1, T2, T3			
Dolny limit -10% ([2] §38.1.2a)		5670 V	
Górny limit +10% ([2] §38.1.2a)		6930 V	
Uzyskane wyniki			
T1			
Wartość	L1-L2	L2-L3	L3-L1
minimalna	6,21 kV	6,19 kV	6,19 kV
średnia	6,31 kV	6,29 kV	6,30 kV
maksymalna	6,39 kV	6,38 kV	6,38 kV
Liczba wartości	4316	4316	4316
Wartości poniżej 6,3 kV	1680 (39%)	2402 (55,6%)	2246 (52,1%)
Wartości równe 6,3 kV	159 (3,6%)	152 (3,6%)	144 (3,3%)
Wartości powyżej 6,3 kV	2477 (57,4%)	1762 (40,8%)	1926 (44,6%)
T2			
Wartość	L1-L2	L2-L3	L3-L1
minimalna	6,21 kV	6,20 kV	6,19 kV
średnia	6,32 kV	6,30 kV	6,30 kV
maksymalna	6,40 kV	6,40 kV	6,38 kV
Liczba wartości	4316	4316	4316
Wartości poniżej 6,3 kV	1403 (32,4%)	1898 (44%)	1957 (45,3%)
Wartości równe 6,3 kV	111 (2,6%)	151 (3,5%)	181 (4,2%)
Wartości powyżej 6,3 kV	2802 (65%)	2267 (52,5%)	2178 (50,5%)
T3			
Wartość	L1-L2	L2-L3	L3-L1
minimalna	6,14 kV	6,11 kV	6,11 kV
średnia	6,34 kV	6,31 kV	6,31 kV
maksymalna	6,51 kV	6,48 kV	6,48 kV
Liczba wartości	4316	4316	4316
Wartości poniżej 6,3 kV	853 (19,8%)	1820 (42,2%)	1796 (41,6%)
Wartości równe 6,3 kV	152 (3,5%)	216 (5%)	266 (6,2%)
Wartości powyżej 6,3 kV	3311 (76,7%)	2280 (52,8%)	2254 (52,2%)

odchylen napięć (III grupa przyłączeniowa) na poziomie $\pm 10\%$ [2, §38.1.2a]. Tak niewielkie zmiany napięcia są wynikiem regulacji odczepów transformatorów 110/6 kV. Transformatory te w swej konstrukcji mają 40 odczepów po stronie wtórnej transformatora, które mogą być zmieniane podczas obciążenia. Zmiana ta jest wykonywana przy udziale automatyki regulacyjnej oraz przełączników zmiany odczepów.

W tabeli 1 zestawiono wartości napięć oraz ich odchylenia dla wszystkich trzech transformatorów. Jak można zauważyć największe wahania napięcia występują dla transformatora T3, który zasilają zakład metalurgiczny, z piecem indukcyjnym o mocy 2×6 MW. Piec ten składa się z dwóch identycznych sekcji, z czego jedna służy do wytapiania żeliwa i pracuje z pełną mocą 6 MW, natomiast druga sekcja pracuje z mocą 1 MW i służy do podtrzymanie żeliwa w stanie płynnym. Ponadto obydwie sekcje są dualne, co oznacza, że mogą pracować zamiennie. W tabeli 3 zestawiono również procentowy udział wartości pomiarowych w danych przedziałach napięcia, czyli wartości równych 6,3 kV, wartości poniżej oraz powyżej 6,3 kV. Dane te dla napięcia L1-L2 dla T1 przedstawiono na rys. 2.

Rysunek 2 przedstawia liczbę zarejestrowanych wartości dla napięcia L1-L2 z okresu pomiarowego. Zarejestrowano 4316 wartości z danego okresu (tab. 1), co odpowiada odczytowi z okresem 10 minutowym. 1680 wartości z tego zbioru to wartości poniżej 6,3 kV – 39% wszystkich zarejestrowanych wartości. 159 wartości to dokładnie 6,3 kV – 3,6%. Pozostałe 2477 wartości powyżej 6,3 kV stanowi 57,4%.



Rys. 2. Histogram odchylen wartości skutecznej napięcia po stronie wtórnej transformatora T1
 Fig. 2. Histogram of deviations of the root mean square voltage on the secondary side of T1 transformer

2.2. Wartości skuteczne prądów

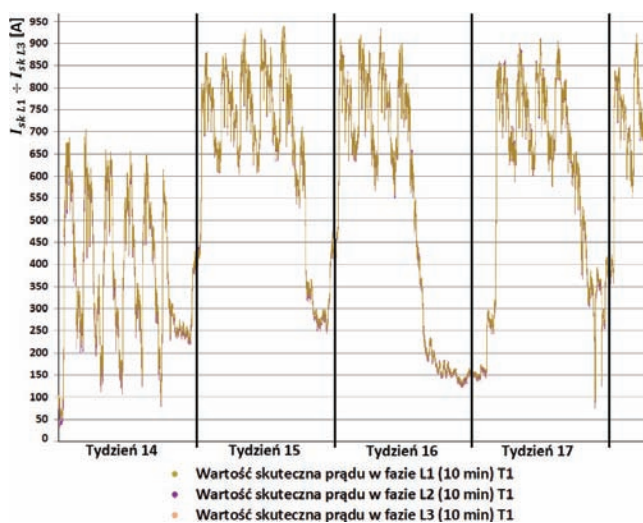
Z wykresu przebiegu prądów dla transformatora T1 wynika charakter pracy zasilanych obiektów. Można z niego wnioskować 3-zmianowy tryb pracy od poniedziałku do piątku. Dodatkowo wartość obciążenia jest powtarzalna.

Dla transformatora T2 przebiegi prądowe przyjmują podobny charakter jak dla T1, co świadczy o podobnym charakterze pracy zasilanych obiektów.

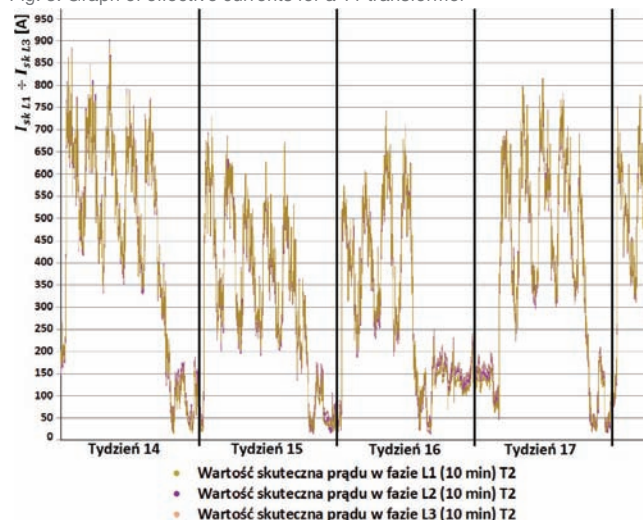
Na rys. 5 przedstawiono wykresy przebiegów prądów dla transformatora T3, który zasilają zakład metalurgiczny. Charakter pracy zakładu jest inny niż w przypadku zakładów zasilanych z transformatorów T1 i T2. Zakład pracuje w 3-zmianowym trybie pracy od poniedziałku do piątku. Obciążenie każdego dnia spada do minimum a następnie rośnie do maksimum podczas wytapiania surowki żelaznej.

Tab. 2. Wartości prądów dla transformatorów T1, T2 i T3
 Tab. 2. Current values for transformers T1, T2 and T3

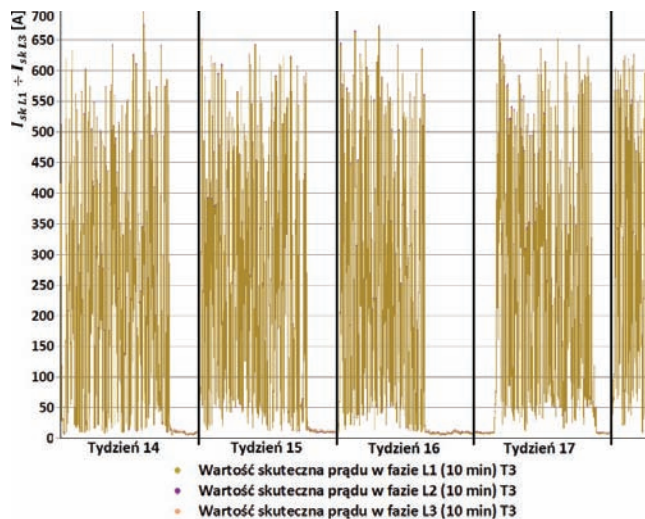
$I_{z L1, L2, L3}$	
T1	
Wartość minimalna	52,56 A
Wartość średnia	539,75 A
Wartość maksymalna	938,81 A
T2	
Wartość minimalna	14,14 A
Wartość średnia	358,69 A
Wartość maksymalna	884,91 A
T3	
Wartość minimalna	0,53 A
Wartość średnia	190,83 A
Wartość maksymalna	693,72 A



Rys. 3. Wykres wartości skutecznych prądów dla transformatora T1
 Fig. 3. Graph of effective currents for a T1 transformer



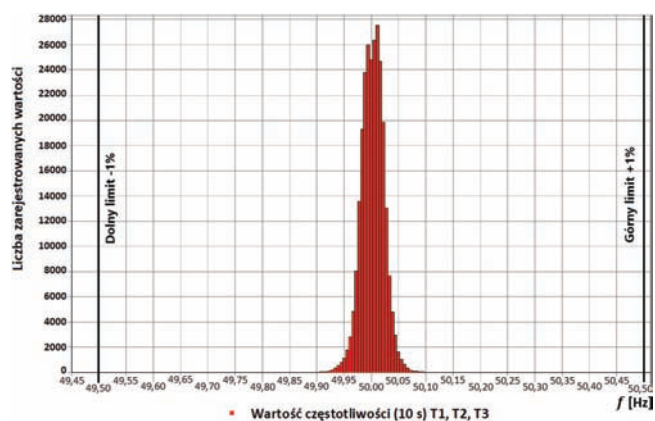
Rys. 4. Wykres wartości skutecznych prądów dla transformatora T2
 Fig. 4. Graph of effective current values for T2 transformer



Rys. 5. Wykres wartości skutecznych prądów dla transformatora T3
 Fig. 5. Graph of effective current values for T3 transformer

2.3. Częstotliwość napięcia i jej odchylenia

Kolejnym podstawowym parametrem energii elektrycznej jest częstotliwość napięcia i jej odchylenia.



Rys. 6. Histogram odchylenia wartości częstotliwości dla T1, T2 i T3
 Fig. 6. Histogram of frequency deviations for T1, T2 and T3

Wartości odchylenia częstotliwości przedstawione na rysunku 10 są identyczne dla wszystkich trzech transformatorów. Wartości te zależą wyłącznie od częstotliwości napięcia z sieci dystrybucyjnej 110 kV. Wykres 6 przedstawia 259 050 wartości pomiarowych – odczyt wartości co 10 s. Wykres słupkowy jest silnie skupiony w okolicy 50 Hz z minimalną tendencją do wartości powyżej nominalnej. W pomiarach nie zaobserwowano fluktuacji częstotliwości, co świadczy o braku zakłóceń związanych z częstotliwością w danym systemie elektroenergetycznym.

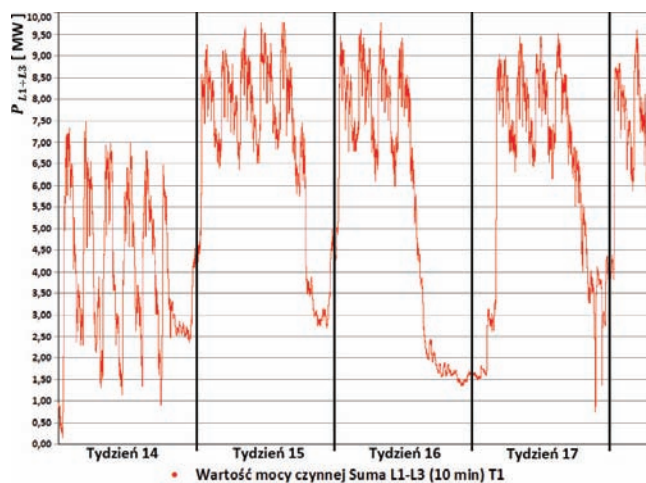
2.4. Moc czynna, bierna i pozorna Budeanu

Na rysunku 7 przedstawiono wykres mocy czynnej z danego okresu dla transformatora T1. Podobnie jak dla przebiegów prądów z rysunku 3 można na nim wyróżnić 3-zmianowy charakter pracy zakładu z wolnymi weekendami. Obciążenie dla tego transformatora waha się w granicach od 0,5 MW do niemal 10 MW.

Na rysunku 8 można natomiast zaobserwować wykres mocy biernej dla transformatora T1. Z charakteru zakładu, zainstalowanych w nim urządzeń oraz konfiguracji rozdzielni głównych można stwierdzić, że podczas pracy zakładu pobierana jest znaczna ilość mocy biernej indukcyjnej (docho-

Tab. 3. Wartości mocy czynnej, biernej i pozornej dla T1, T2 i T3
 Tab. 3. Active, reactive and apparent power values for T1, T2 and T3

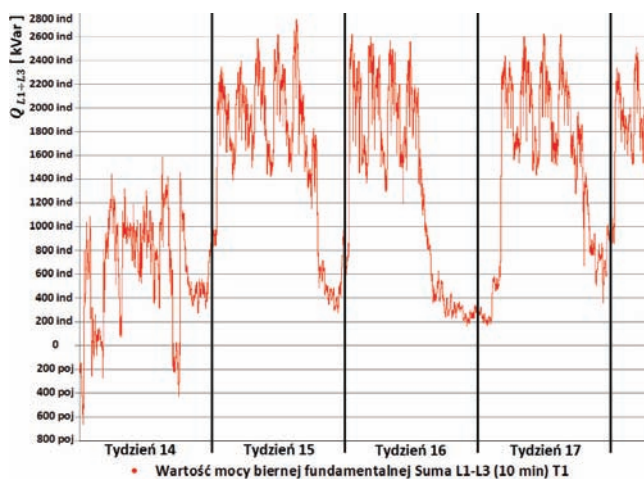
P, Q, S dla T1, T2, T3				
		T1	T2	T3
Moc czynna [kW]	minimalna	145,1	71,7	0,5
	średnia	5673,4	3332,9	1920,1
	maksymalna	9792,1	9738,3	7085,6
Moc bierna [kVar]	minimalna	663,1 poj	2026,4 poj	58 ind
	średnia	1286,6 ind	67,1 ind	648,4 ind
	maksymalna	2738,7 ind	2171,6 ind	2229 ind
Moc pozorna [kVA]	minimalna	468,3	182,9	58
	średnia	5833,8	3901,7	2082,4
	maksymalna	10144,4	9750,6	7433,9



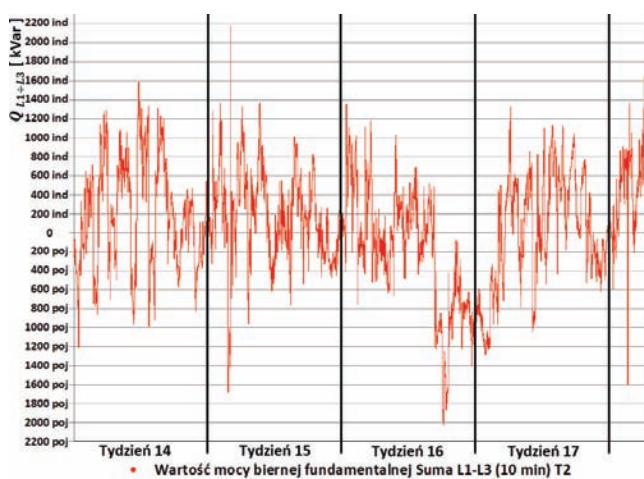
Rys. 7. Wykres mocy czynnej dla transformatora T1
 Fig. 7. Active power graph for T1 transformer

dżąc do 2,8 MVar) co wynika z indukcyjnego charakteru większości zainstalowanych na obiektach odbiorników. Natomiast podczas weekendów, gdy obciążenie transformatora jest minimalne (tydzień 14, rys. 7, 8) można przypuszczać, że w wyniku działania baterii kondensatorowych oraz efektu ich przekompensowania moc bierna pojemnościowa oddawana jest do sieci energetycznej. Jest to celowe działanie służące poprawie ogólnego współczynnika mocy dla zasilania 110 kV. Jak można zauważyć na rysunku 8 wartość oddawanej mocy biernej pojemnościowej dochodzi do ponad 660 kVar.

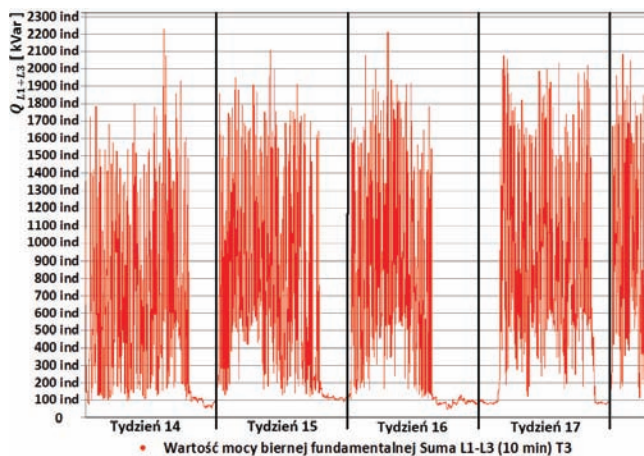
Na rysunku 9 przedstawiono wykres mocy biernej dla transformatora T2. Podobnie jak dla transformatora T1 można przypuszczać, że ze względu na działanie baterii kondensatorowych w czasie minimalnego obciążenia transformatora moc bierna pojemnościowa oddawana jest do sieci energetycznej celem poprawy ogólnego wsp. mocy dla zasilania 110 kV. Takie działanie opisane jest w Dz. U. Nr 93 poz. 623, §38.7. Punkt ten mówi o tym, że podmioty przyłączone do sieci o napięciu znamionowym 110 kV i wyższym powinny wprowadzać do tej sieci lub pobierać z tej sieci moc bierną przy współczynniku tgφ mniejszym niż 0,4. Dzięki temu działaniu możliwa jest



Rys. 8. Wykres mocy biernej dla transformatora T1
 Fig. 8. Reactive power diagram for T1 transformer



Rys. 9. Wykres mocy biernej dla transformatora T2
 Fig. 9. Reactive power diagram for T2 transformer



Rys. 10. Wykres mocy biernej dla transformatora T3
 Fig. 10. Reactive power diagram for T3 transformer

poprawa wsp. mocy dla zasilania 110 kV, które podlega rozliczaniu z dostawcą.

Rysunek 10 przedstawia wykres mocy biernej dla transformatora T3. Jak można zauważyć wykres mocy biernej dla tego transformatora ma zbliżony przebieg do wartości prądu z rys. 5. Dodatkowo można zauważyć, że dla tego transformatora nie występuje kompensacja mocy biernej, co negatywnie wpływa

na wartość współczynnika mocy (rys. 13). Z uwagi na fakt, że dla tego zakładu nie występuje kompensacja mocy biernej, konieczna jest poprawa współczynnika mocy dla przyłącza 110 kV przez oddawanie mocy biernej pojemnościowej poprzez transformatory T1 i T2.

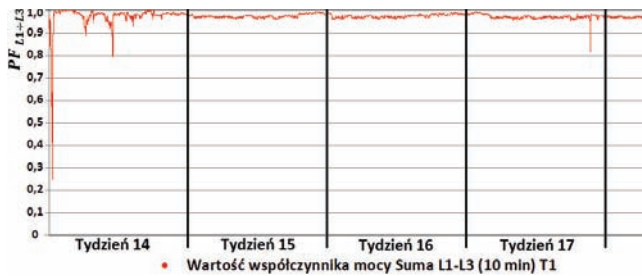
2.5. Współczynnik mocy

Współczynnik mocy dla transformatora T1 i T2 przyjmuje podobne wartości (rys. 11, 12). Wartość średnia wsp. mocy dla transformatora T1 wyniosła 0,97, natomiast dla T2 0,95. Inaczej sytuacja przedstawia się w przypadku transformatora T3 (rys. 13), gdzie współczynnik mocy waha się w granicach 0,98–0,09, a jego wartość średnia wyniosła 0,62. Wykresy te ukazują, jak ogromny wpływ ma kompensacja mocy biernej na wartość współczynnika mocy.

Tab. 4. Wartości współczynnika mocy dla T1, T2 i T3

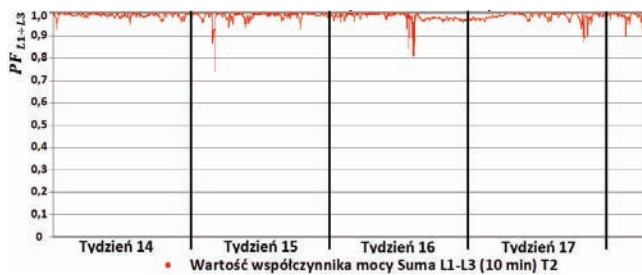
Tab. 4. Power factor values for T1, T2 and T3

		T1, T2, T3		
		T1	T2	T3
Współczynnik mocy	minimalny	0,25	0,75	0,09
	średni	0,97	0,95	0,62
	maksymalny	1,00	1,00	0,98



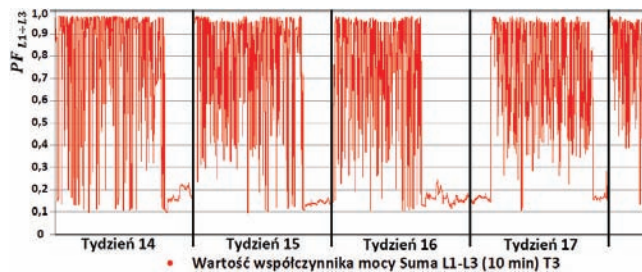
Rys. 11. Wykres współczynnika mocy dla transformatora T1

Fig. 11. Power factor diagram for T1 transformer



Rys. 12. Wykres współczynnika mocy dla transformatora T2

Fig. 12. Power factor diagram for T2 transformer



Rys. 13. Wykres współczynnika mocy dla transformatora T3

Fig. 13. Power factor diagram for T3 transformer

2.6. Asymetria napięć

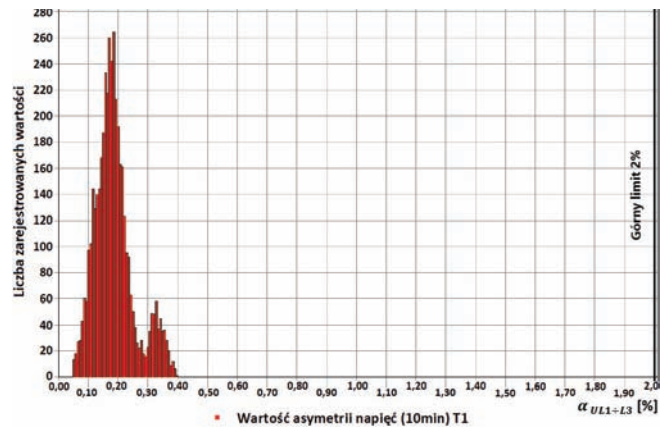
Kolejno odnosząc się do rozważań teoretycznych dokonano analizy asymetrii napięć dla transformatorów.

Na wykresie 14 przedstawiono wartość asymetrii napięć po stronie wtórnej transformatora T1. Dla napięcia 6 kV należącego do trzeciej grupy przyłączeniowej zgodnie z Dz. U. z dnia 29 maja 2007 r. oraz normą PN-EN 50160:2010, w ciągu każdego tygodnia ze zbioru 95% 10-minutowych średnich wartości skutecznych składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego wartość ta nie powinna przekraczać 2% wartości składowej kolejności zgodnej [2].

Tab. 5. Wartości asymetrii napięć 6 kV dla T1, T2 i T3

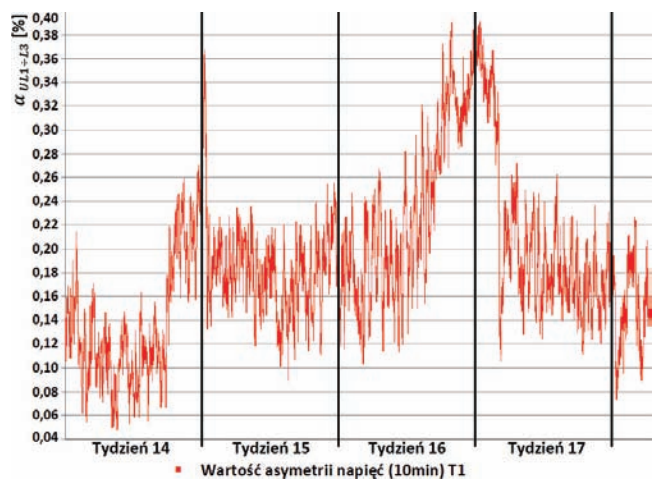
Tab. 5. Voltage asymmetry values of 6 kV for T1, T2 and T3

Asymetria napięć 6 kV T1, T2, T3			
Górny limit (Dz. U. Nr 93 Poz. 623, §38.3.4a)	2%		
Uzyskane wyniki			
Wartość	T1	T2	T3
minimalna	0,05%	0,03%	0,25%
średnia	0,19%	0,19%	0,34%
maksymalna	0,4%	0,71%	0,47%
Liczba wartości pomiarowych	4316	4316	4316



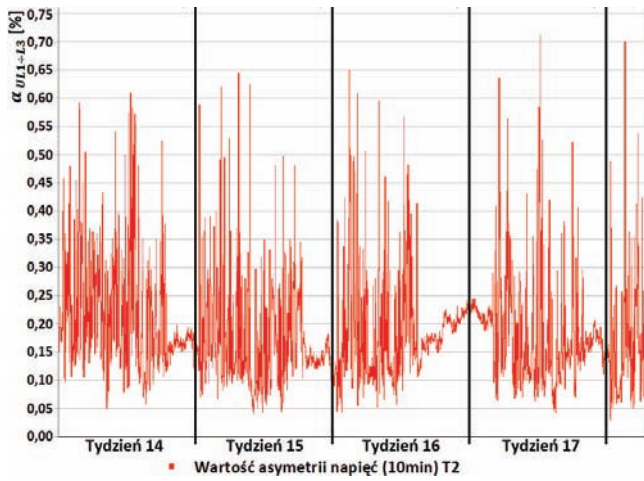
Rys. 14. Histogram asymetrii napięć dla transformatora T1

Fig. 14. Histogram of voltage asymmetry for T1 transformer

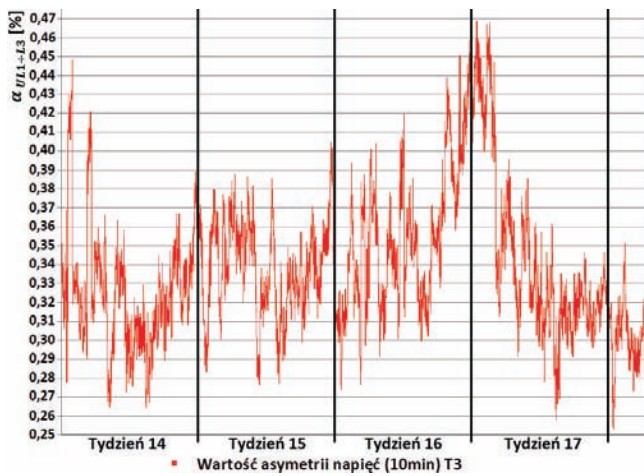


Rys. 15. Wykres asymetrii napięć dla transformatora T1

Fig. 15. Voltage asymmetry diagram for T1 transformer



Rys. 16. Wykres asymetrii napięć dla transformatora T2
Fig. 16. Voltage asymmetry graph for T2 transformer



Rys. 17. Wykres asymetrii napięć dla transformatora T3
Fig. 17. Voltage asymmetry diagram for T3 transformer

Tab. 6. Wartości THD napięć dla T1, T2 i T3
Tab. 6. THD values of voltages for T1, T2 and T3

THD z L1, L2, L3 napięcia 6 kV T1, T2, T3			
Górny limit (Dz. U. Nr 93 Poz. 623, §38.3.5) do 40 harm.	8%		
Uzyskane wyniki			
Wartość	T1	T2	T3
minimalna	0,75%	0,45%	0,81%
średnia	1,87%	1,04%	1,98%
maksymalna	3,51%	1,92%	3,70%
Liczba wartości pomiarowych	4316	4316	4316

Przebiegi asymetrii napięć transformatorów T1 oraz T3 są do siebie bardzo zbliżone (rys. 15–17). Jest to spowodowane zasilaniem stron pierwotnych tych transformatorów z tej samej linii 110 kV. Transformator T2 zasilany jest z linii 110 kV nr 2, jego charakterystyka asymetrii napięć różni się od T1 i T3. Świadczy to o tym, że dla tych dwóch linii zasilających występują różne poziomy asymetrii napięć.

2.7. THD napięć fazowych

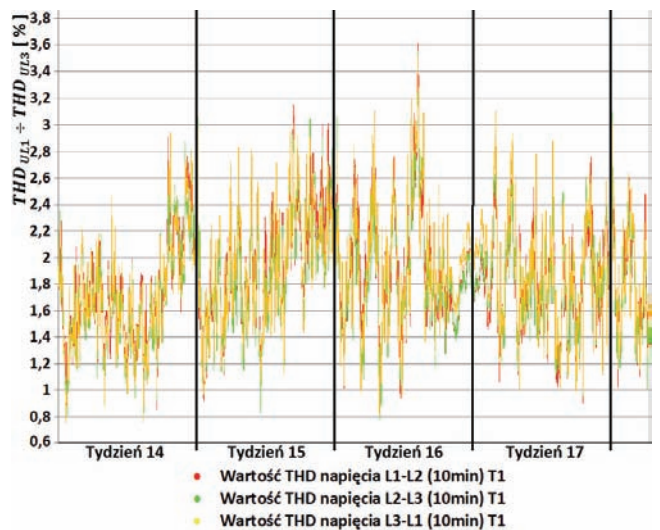
Istotnym parametrem dotyczącym jakości dostaw energii elektrycznej jest współczynnik zawartości harmonicznych zarówno dla napięć jak i prądów.

Wykres 18 pokazuje przebiegi wartości THD napięć dla transformatora T1 do 40. harmonicznej. Aby dokładnie przeanalizować dane przebiegi napięć każdy z nich należy rozłożyć na poszczególne harmoniczne (rys. 19). Podczas tego działania należy zwrócić uwagę na kolejność faz poszczególnych harmonicznych (tab. 7).

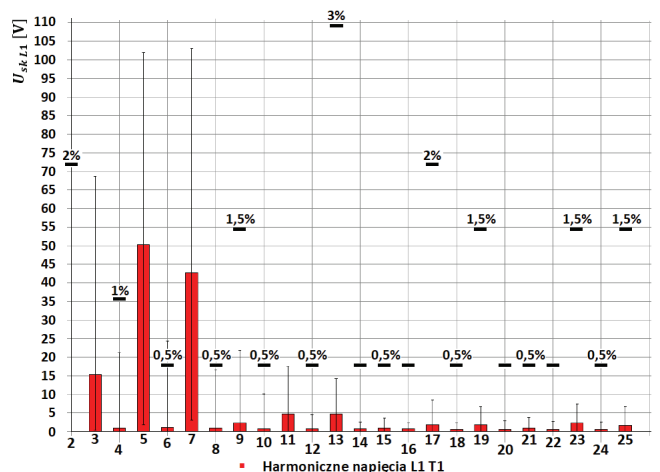
Tab. 7. Relacja między kolejnością faz i rzędem harmonicznej [4]
Tab. 7. Relationship between phase sequence and harmonic order [4]

Kolejność faz	Zgodna	Przeciwna	Zerowa
Rząd harmonicznej	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9

	3k+1	3k+2	3k+3 k = 0, 1, 2, 3, ...



Rys. 18. Wykres THD napięć dla transformatora T1
Fig. 18. THD diagram of voltages for T1 transformer



Rys. 19. Wykres harmonicznych napięcia L1 dla transformatora T1
Fig. 19. L1 voltage harmonics graph for T1 transformer

Na rysunku 19 przedstawiono rozłożenie przebiegu napięcia z fazy L1 z rys. 18 na poszczególne harmoniczne. Czarne cienkie linie dla każdej z harmonicznych ukazują zakres zarejestrowanych w danym okresie wartości. Czerwone słupki wyznaczają natomiast wartości średnie dla poszczególnych harmonicznych z danego okresu. W procentach natomiast podano dopuszczalne wartości przewidziane przez Dz. U. Nr 93 Poz. 623, §38.3.4b, które na osi y zostały przeliczone na wartości napięcia. Ze względu na rozmiary rysunku na osi y nie umieszczono wszystkich dopuszczalnych wartości, które odpowiednio wynoszą: dla 3h 5% = 182 V, dla 5h 6% = 222 V, dla 7h 5% = 182 V, dla 11 h 3,5% = 129 V. Na rysunku ograniczono liczbę harmonicznych do 25. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem rzędu h-tej harmonicznej jej wpływ na wartość całkowitą *THD* maleje. Wynika z niego również, że dla tego przebiegu harmoniczne powyżej 13. mają już niewielki wpływ w całkowitym ich udziale [3].

Przebiegi wartości *THD* napięć dla transformatora T1 i T2 są zbliżone do siebie (rys. 18 i 20). Wynika to z podobnego charakteru pracy zasilanych obiektów oraz podobieństwa zainstalowanych odbiorników. *THD* napięć dla transformatora T1 przyjmuje nieco wyższe wartości niż dla transformatora T2. Wynika to z większego obciążenia transformatora T1 od transformatora T2 (odkształconymi prądami) (tab. 2, rys. 3 i 4). Odkształcone

prądy powodują odkształcanie napięć zasilających, co przekłada się na wartość *THD* dla przebiegów napięć.

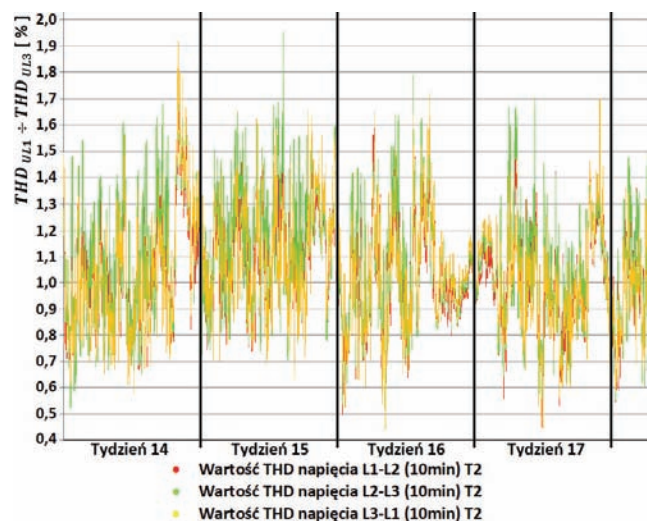
Przebiegi wartości *THD* napięć dla transformatora T3 znacząco różnią się od przebiegów wartości *THD* napięć dla transformatorów T1 i T2. Przebieg z rysunku 21 charakteryzuje się dużym podobieństwem do przebiegu prądu z rys. 5. Przebieg ten ukazuje charakter pracy zakładu, w którym zainstalowano piec indukcyjny znacznej mocy, który jest odbiornikiem nieliniowym. Podczas pracy pieca w wyniku odkształconych przebiegów prądów dochodzi do odkształcania przebiegów napięć zasilających (rys. 21). Tezę tę potwierdza fakt, że transformatory T1 i T3 zasilane są z tej samej linii 110 kV, są więc obciążone od strony zasilania identyczną zawartością wyższych harmonicznych dla przebiegów napięć. Fakt ten udowadnia, że różnice między zawartością *THD* dla napięć transformatorów T1 i T3 wynikają w dużej mierze z charakteru przyłączonych odbiorników.

Zawartość *THD* dla przebiegów napięć transformatorów T1, T2 i T3 po stronie wtórnej mieści się w normie [Dz. U. Nr 93 poz. 623, § 38.3.5], która przewiduje ich zawartość do 8% – tab. 6 oraz rys. 18–21. Należy nadmienić, że w okresie od 14 do 17 tygodnia 2019 r. transformatory i rozdzielnie pracowały bez żadnych ruchów sieciowych i zakłóceń.

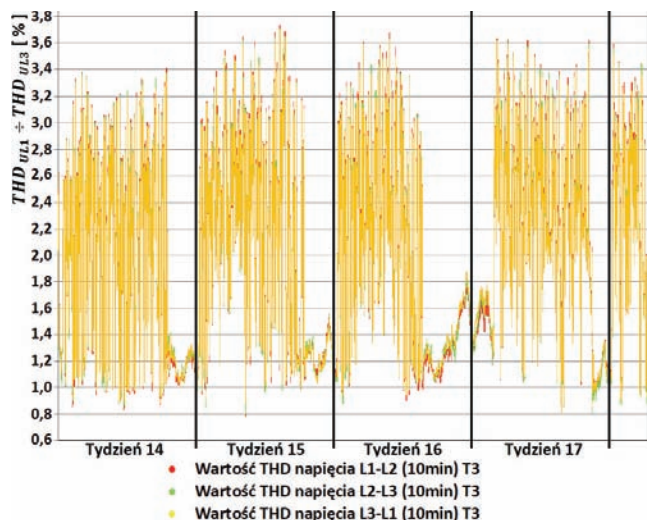
2.8. THD prądów fazowych

W tabeli 8 zestawiono wartości *THD* napięć i prądów dla wszystkich trzech transformatorów z okresu 1.05.2019 – 31.05.2019. W tym okresie dokonywano czynności łączeniowych na szynach rozdzielni 6 kV, w wyniku których transformatory T1 i T3 zostały odłączone od ruchu sieciowego. Ruchu sieciowego dokonano podczas normalnej eksploatacji GPZ, aby uniknąć przerw w dostawie energii elektrycznej. Dokonano łączy w takiej konfiguracji, aby transformator T2 mógł bezprzerwowo zasilić wszystkie pola odpiływowe.

Czynność łączeniowa nastąpiła w niedzielę 19.05.2019 (rys. 22 i 23).



Rys. 20. Wykres THD napięć dla transformatora T2
Fig. 20. THD graph of voltages for T2 transformer



Rys. 21. Wykres THD napięć dla transformatora T3
Fig. 21. THD diagram of voltages for T3 transformer

Tab. 8. Wartości THD napięć i prądów dla T1, T2 i T3
Tab. 8. THD values of voltages and currents for T1, T2 and T3

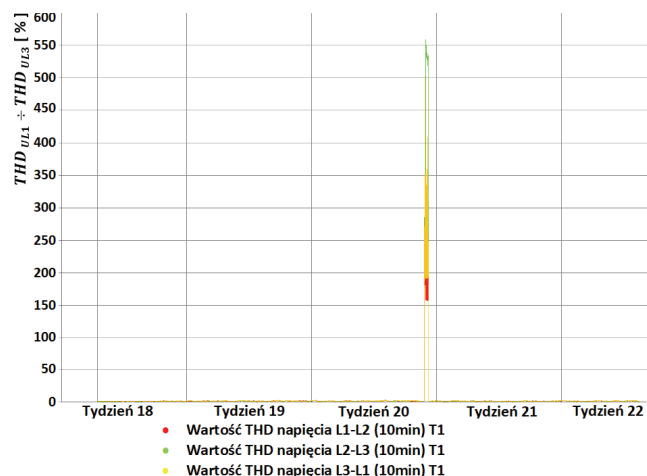
THD z L1, L2, L3 napięcia dla T1, T2, T3			
Górny limit (Dz. U. Nr 93 Poz. 623, §38.3.5) do 40 harmonicznej	8%		
Uzyskane wyniki			
Wartość	T1	T2	T3
minimalna	0,91%	0,54%	0,71%
średnia	3,99%	1,32%	8,79%
maksymalna	502,70%	2,71%	1110,76%
Liczba wartości pomiarowych	4375	4375	4375
THD prądów w fazie L1, L2, L3 dla T1, T2, T3			
Uzyskane wyniki			
Wartość	T1	T2	T3
minimalna	1,45%	1,83%	1,61%
średnia	10,81%	14,82%	11,51%
maksymalna	533,90%	309,11%	212,22%
Liczba wartości pomiarowych	2130	4375	547

W wyniku łączenia sekcji I, II i III przez układy sprężelowe po stronie 6 kV, a następnie odłączenia transformatorów T1 i T3, w przebiegach THD napięć i prądów obydwu transformatorów (rys. 22–24) wystąpiły piki wartości, które znacznie

odbiegają od wartości THD dla napięć i prądów podczas normalnej pracy układu.

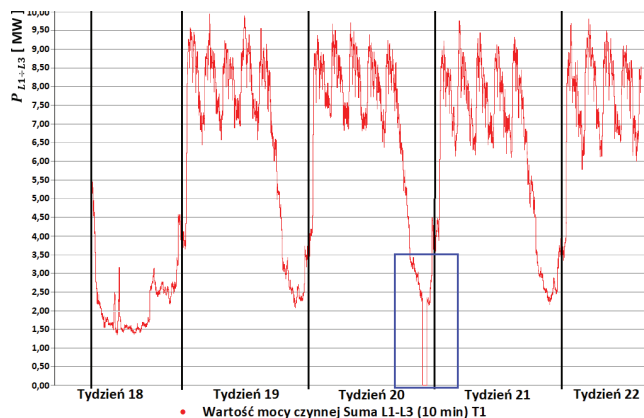
Sytuację tę potwierdzają zarejestrowane przebiegi mocy czynnej dla tych transformatorów z danego okresu (rys. 25 i 26).

Transformator T1 został odłączony z ruchu sieciowego (rys. 25), a jego obciążenie przejął transformator T2 (rys. 26).



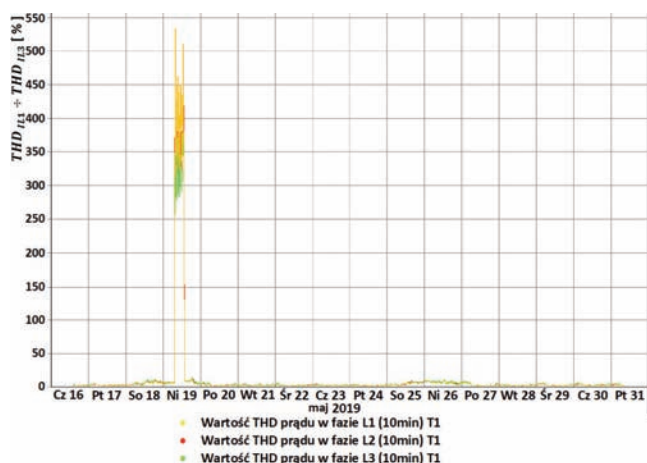
Rys. 22. Wykres THD napięć dla transformatora T1 podczas ruchu sieciowego

Fig. 22. THD graph of voltages for T1 transformer during network traffic



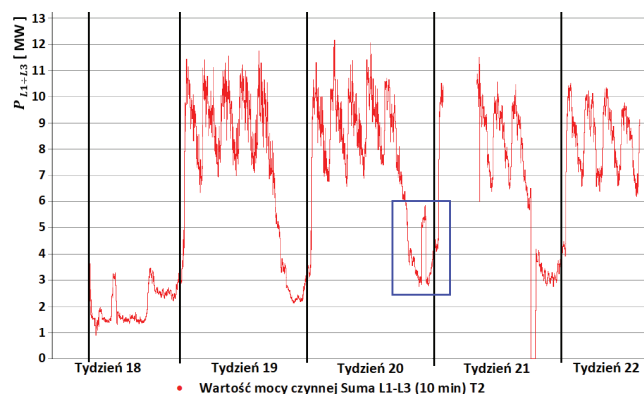
Rys. 25. Wykres mocy czynnej dla transformatora T1 z ruchem sieciowym

Fig. 25. Active power graph for T1 transformer with recorded network traffic



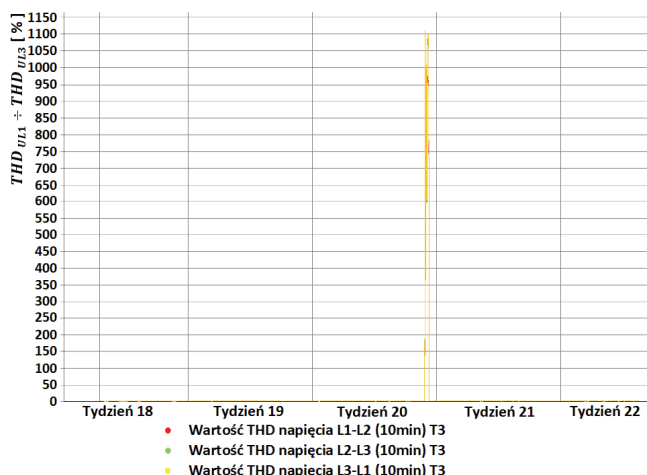
Rys. 23. Wykres THD prądów dla transformatora T1 z zarejestrowanym ruchem sieciowym

Fig. 23. THD graph of currents for T1 transformer with recorded network traffic



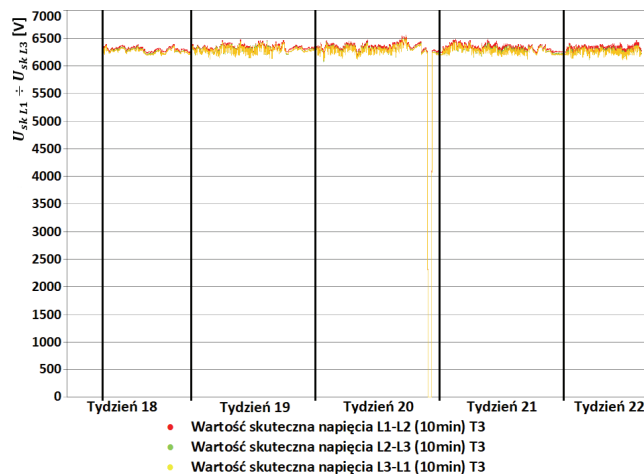
Rys. 26. Wykres mocy czynnej dla transformatora T2 z ruchem sieciowym

Fig. 26. Active power graph for T2 transformer with recorded network traffic



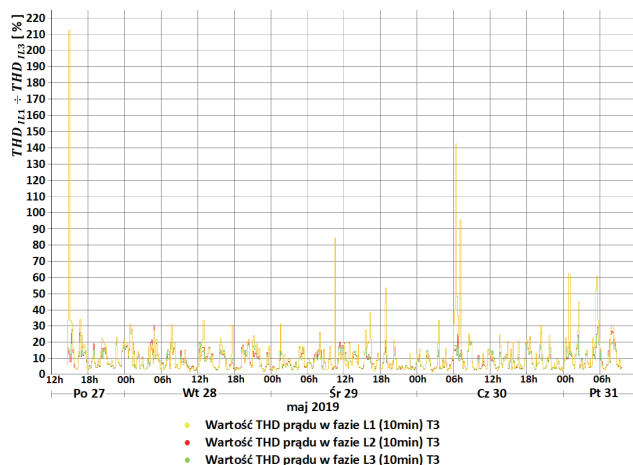
Rys. 24. Wykres THD napięć dla transformatora T3 podczas ruchu sieciowego

Fig. 24. THD graph of voltages for T3 transformer during network traffic



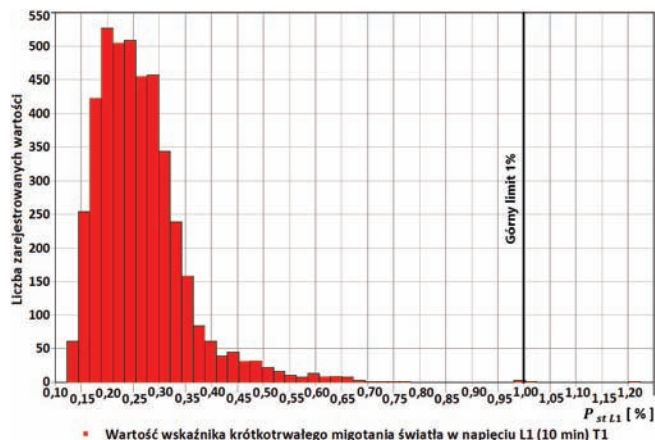
Rys. 27. Wykres wartości skutecznych napięć po stronie wtórnej transformatora T3 z ruchem sieciowym

Fig. 27. Graph of effective voltage values on the secondary side of T3 transformer with registered network traffic



Rys. 28. Wykres THD prądów dla transformatora T3 poza ruchem sieciowym

Fig. 28. THD graph of currents for T3 transformer outside of network traffic



Rys. 29. Histogram wartości wskaźnika krótkotrwałego migotania światła w napięciu L1 dla transformatora T1

Fig. 29. Histogram of the value of the indicator of short-term light flicker at voltage L1 for T1 transformer

Transformator T3 również został odłączony (rys. 27), lecz jego obciążenie było na tyle małe, że nie wpłynęło w znacznym stopniu na obciążenie transformatora T2. Można zauważyć (rys. 26), że w kolejnym tygodniu (tzn. 21.) transformator T2 został odłączony, a T1 i T3 pracowały.

Czynności łączeniowe mają duże znaczenie na poziom zakłóceń i zawartość harmonicznych w przebiegach napięć i prądów. Podczas łączeń wartości THD dla prądów osiągają znaczne wartości, przez co powodują znaczne odkształcenia przebiegów napięć a tym samym chwilowe zakłócenia w danej części sieci elektroenergetycznej.

Dla porównania na rysunku 28 przedstawiono wartości THD prądów dla transformatora T3 poza okresem, w którym dokonywano łączeń. Jak widać w sieci 6 kV piki wartości THD dla prądów przekraczają nawet 200%, ale wartość średnia oscyluje w granicach 10–15%. Wartości THD dla napięć dochodzą natomiast do około 4% (tab. 6), co stanowi połowę dopuszczalnego limitu.

2.9. Migotania krótkotrwałe

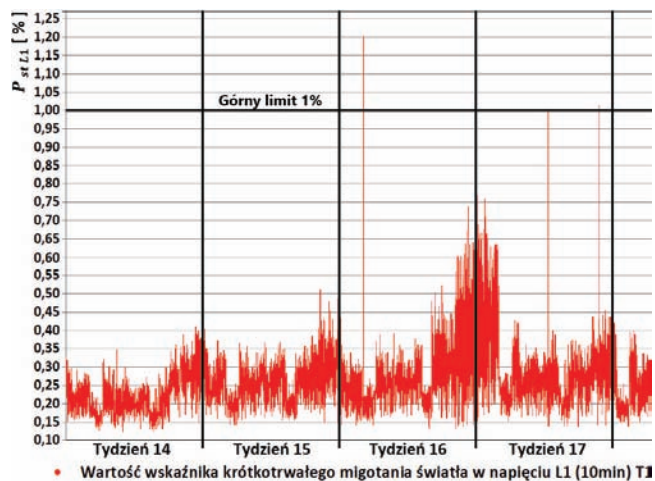
Na wykresie 29 przedstawiono liczbę zarejestrowanych wartości z danego okresu pomiarowego w odniesieniu do ich wartości. Jak można zauważyć największa ich liczba jest skumulowana w okolicach wartości 0,15–0,35%, a wartość średnia z całego okresu wyniosła 0,26% zgodnie z tabelą 9. Wartości te są poniżej dopuszczalnego limitu 1%, choć na rysunkach 29 i 30 można zauważyć, że następują krótkotrwałe przekroczenia.

Z wykresów 30–32 przedstawiających wskaźniki krótkotrwałego migotania światła w napięciu L1 dla transformatorów T1, T2 i T3 można zaobserwować, że najniższe wartości występują dla transformatora T2, a najwyższe dla T3. Dla fazy L2 i L3 sytuacja wygląda podobnie, co potwierdzają wartości z tabeli 9. Dodatkowo można zaobserwować, że wskaźniki te dla wszystkich trzech transformatorów przyjmują najwyższe wartości w fazie L2. Porównując wartości wskaźnika krótkotrwałego migotania światła dla transformatorów T1 i T2 zasilanych z tej samej linii 110 kV można stwierdzić, że wartość obciążenia (tab. 2, rys. 3 i 4) ma również istotny wpływ na jego wartość. Szczególnie znaczące w tym przy-

Tab. 9. Wartości wskaźnika krótkotrwałego migotania światła w napięciach transformatorów T1, T2 i T3
Tab. 9. Values of short-term flicker indicator for T1, T2 and T3 transformer voltages

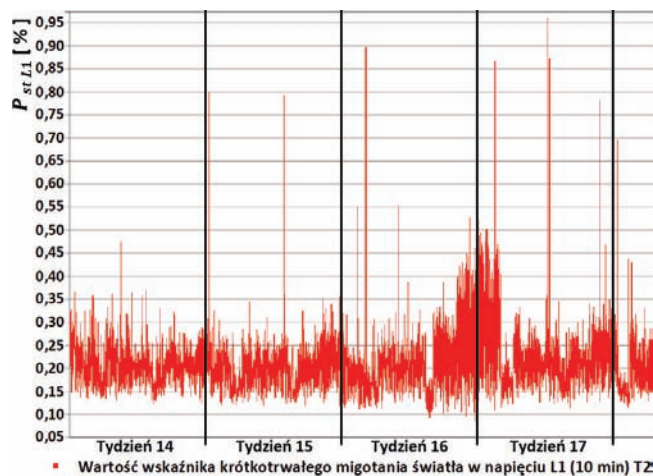
Wskaźnik P_{st} z napięcia L1, L2, L3 dla T1, T2, T3									
Górny limit								1%	
Uzyskane wyniki									
Wartość	T1			T2			T3		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
minimalna	0,12	0,12	0,13	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
średnia	0,26	0,27	0,27	0,21	0,21	0,21	0,36	0,36	0,36
maksymalna	1,20	2,87	0,98	0,96	2,07	1,25	1,65	3,73	1,67
Liczba wartości pomiarowych	4314								

padku są szybkie zmiany obciążenia, które wpływają na wahania napięcia. Wartym uwagi jest również wykres 32, który obrazuje realny wpływ nieliniowego pieca indukcyjnego znacznej mocy na wahania napięcia dla transformatora T3. Wahania te osiągają najwyższe wartości spośród wszystkich trzech transformatorów ze względu na znaczne zmiany wartości płynących prądów (rys. 5).

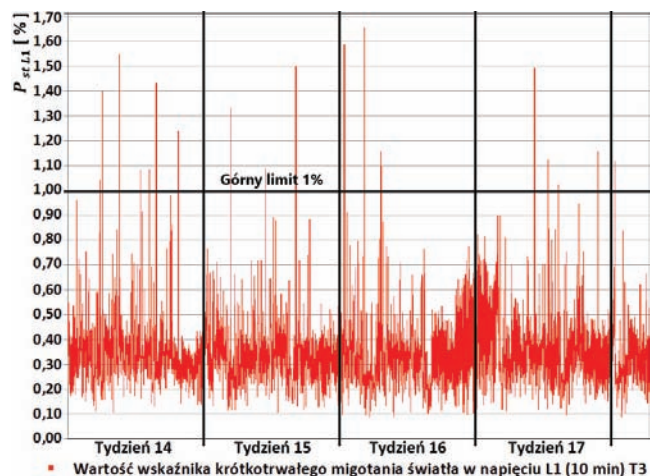


Rys. 30. Wykres wartości wskaźnika krótkotrwałego migotania światła w napięciu L1 dla transformatora T1

Fig. 30. Graph of the value of the indicator of short-term flicker of light at voltage L1 for T1 transformer



Rys. 31. Wykres wartości wskaźnika krótkotrwałego migotania światła w napięciu L1 dla transformatora T2
Fig. 31. Graph of the value of the indicator of short-term flicker of light at voltage L1 for T2 transformer



Rys. 32. Wykres wartości wskaźnika krótkotrwałego migotania światła w napięciu L1 dla transformatora T3
Fig. 32. Graph of the value of the indicator of short-term flicker of light at voltage L1 for T3 transformer

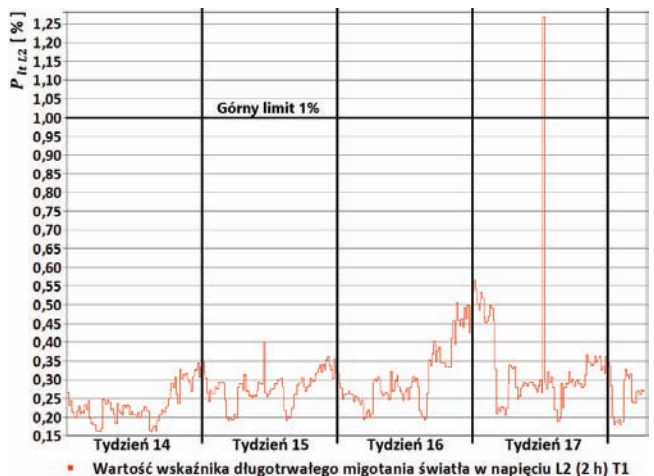
Wskaźniki P_{st} i P_{lt} odnoszą się do odczuć człowieka związanych z efektem migotania światła (wahania napięcia) w sieci nN. Przepisy PN EN 50160 oraz Dz. U. Nr 93 poz. 623 nie normują wskaźnika P_{st} . Dla sieci nN i SN jest przewidziany wskaźnik P_{lt} (Dz. U. Nr 93 Poz. 623, §38.3.3), którego dopuszczalna wartość to 1%. Przez P_{lt} należy rozumieć wskaźnik obliczany na podstawie sekwencji 12 kolejnych wartości wskaźników krótkookresowego migotania światła P_{st} (mierzonych przez 10 minut) występujących w czasie dwóch godzin (Dz. U. Nr 93 Poz. 623, §39.2).

2.10. Migotania długotrwałe

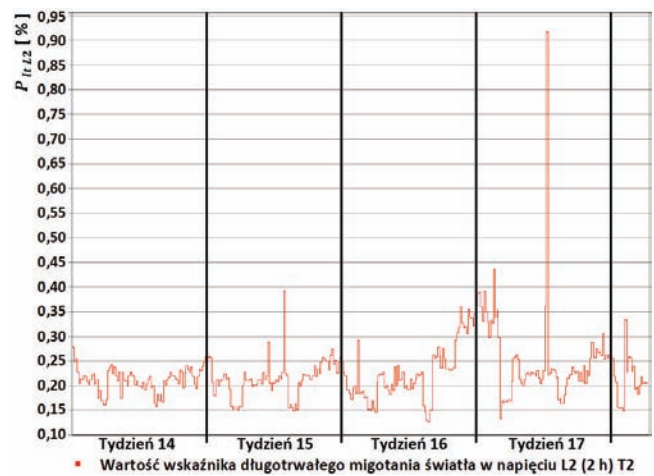
Wykres 33 ilustrujący wskaźnik długotrwałego migotania światła w napięciu fazy L2 dla T1 został wykreślony na podstawie 359 wartości, co odpowiada okresowi 2 h zgodnie z definicją. Ma on bardziej wygładzony kształt przebiegu

w odniesieniu do przebiegów P_{st} , co jest wynikiem uśredniania w dziedzinie wartości.

Podczas normalnej pracy układu zasilania w fazie L2 dla transformatorów T1 oraz T3 wystąpiło przekroczenie wartości wskaźnika P_{lt} (rys. 33–35, tab. 10). Ponieważ wartość szczytowa wskaźnika P_{lt} dla wszystkich trzech transformatorów wystąpiła w tym samym czasie można przypuszczać, że



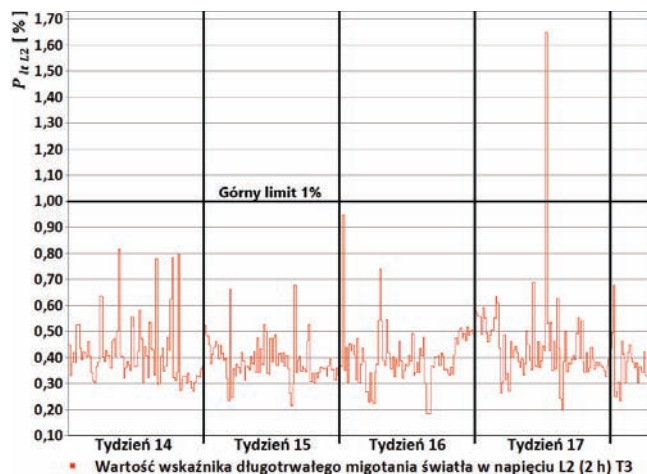
Rys. 33. Wykres wartości wskaźnika długotrwałego migotania światła w napięciu L2 dla transformatora T1
Fig. 33. Graph of long-term flicker of light indicator at L2 voltage for T1 transformer



Rys. 34. Wykres wartości wskaźnika długotrwałego migotania światła w napięciu L2 dla transformatora T2
Fig. 34. Graph of long-term flicker of light indicator at L2 voltage for T2 transformer

Tab. 10. Wartości wskaźnika długotrwałego migotania światła w napięciach transformatorów T1, T2 i T3
Tab. 10. Values of the indicator of long-term flicker in T1, T2 and T3 transformer voltages

Wskaźnik P_{lt} z napięcia L1, L2, L3 dla T1, T2, T3									
Górny limit (Dz. U. Nr 93 Poz. 623, §38.3.3)								1%	
Uzyskane wyniki									
Wartość	T1			T2			T3		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
minimalna	0,16	0,16	0,16	0,13	0,13	0,13	0,19	0,19	0,18
średnia	0,28	0,29	0,29	0,23	0,23	0,22	0,40	0,41	0,40
maksymalna	0,58	1,27	0,55	0,46	0,92	0,56	0,96	1,65	0,96
Liczba wartości pomiarowych	359								



Rys. 35. Wykres wartości wskaźnika długotrwałego migotania światła w napięciu L2 dla transformatora T3

Fig. 35. Graph of long-term flickering light L2 indicator for T3 transformer

została spowodowana zaburzeniem w fazie L2 sieci dystrybucyjnej 110 kV.

2.11. Statystyki zdarzeń

Ostatnim parametrem są statystyki zdarzeń, indywidualnie rejestrowane przez każdy z analizatorów dla poszczególnych transformatorów.

Dla badanego układu zasilania zdarzenia napięciowe (tab. 11) wystąpiły tylko dla transformatora T2, który jest zasilany z linii 110 kV nr 2. Dla transformatorów T1 oraz T3 nie zarejestrowano zdarzeń napięciowych w tym okresie. Z zarejestrowanych wartości można zauważyć kilkukrotne spadki napięcia oraz jeden krótkotrwały zapad napięcia. Fakt ten oraz wyniki asymetrii napięć zasilających (rys. 15–17) dla transformatora T1, T2 oraz T3 pozwalają stwierdzić, że przyłącze z linii 110 kV nr 2 charakteryzuje się nieznacznie gorszą jakością zasilania od przyłącza z linii 110 kV nr 1.

3. Podsumowanie

W artykule analizie poddano pomiary dotyczące GPZ 110/6 kV zasilanego z dwóch linii dystrybucyjnych 110 kV. Pomiarów tych dokonano po stronach wtórnych transformatorów 110/6 kV na torach prądowych sekcji zasilających stację GPZ 6 kV. W wyniku przeprowadzonych pomiarów dokonano porównania parametrów ilościowych jak i jakościowych dostaw energii elektrycznej dla poszczególnych odbiorców.

W wyniku porównania można stwierdzić, że charakter każdego z odbiorców energii elektrycznej jest nieliniowy. Patrząc pod względem obciążenia najbardziej obciążonym transformatorem był transformator T1 następnie T2 a najmniej T3. Ze względu jednak na charakter obciążenia T1 i T2 charakteryzują się znacznym podobieństwem, co jest związane z zainstalowanymi na obiektach odbiornikami nieliniowymi o podobnych cechach. Przebiegi transformatora T3 natomiast ze względu na zainstalowany piec indukcyjny znacznej mocy różnią się od T1 i T2.

W wyniku porównania mocy czynnej, biernej i pozornej dla tych transformatorów można również stwierdzić, że podczas pracy zakładów pobierana była znaczna ilość mocy biernej indukcyjnej, która dla transformatorów T1 i T2 jest kompensowana przez baterie kondensatorowe.

Z przebiegów mocy biernej dla transformatora T3 wynika, że dla tego transformatora nie występuje kompensacja mocy biernej, co potwierdza wykres współczynnika mocy dla transformatora T3. W wyniku tego następuje pogorszenie współczynnika mocy dla przyłącza 110 kV, które podlega rozliczeniu z dostawcą.

Tab. 11. Zarejestrowane zdarzenia dla transformatora T1

Tab. 11. Recorded events for T1 transformer

Zdarzenia dla napięcia L1, L2, L3 dla T1			
Dolny limit			6060 V
Początek 11.04.19 04:20:16'986			
Koniec 11.04.19 04:20:17'026			
Wartość	Faza L2	Długość	Typ
Minimalna	5949,56 V (94,4%)	39,950 ms	Spadek napięcia
Średnia	5968,14 V (94,7%)		
Maksymalna	5999,43 V (95,2%)		
Początek 16.04.19 06:07:21'204			
Koniec 16.04.19 06:07:21'254			
Wartość	Faza L1	Długość	Typ
Minimalna	5779,84 V (91,7%)	50,101ms	Spadek napięcia
Średnia	5858,59 V (92,9%)		
Maksymalna	5973,22 V (94,8%)		
Początek 16.04.19 06:07:21'208			
Koniec 16.04.19 06:07:21'247			
Wartość	Faza L3	Długość	Typ
Minimalna	6001,59 V (95,2%)	39,950 ms	Spadek napięcia
Średnia	6020,48 V (95,5%)		
Maksymalna	6040,58 V (95,8%)		
Początek 25.04.19 17:21:18'074			
Koniec 25.04.19 17:21:18'154			
Wartość	Faza L2	Długość	Typ
Minimalna	5206,60 V (82,6%)	80,000 ms	Zapad napięcia
Średnia	5459,30 V (86,6%)		
Maksymalna	5934,12 V (94,2%)		
Początek 25.04.19 17:21:18'077			
Koniec 25.04.19 17:21:18'137			
Wartość	Faza L1	Długość	Typ
Minimalna	5919,02 V (93,9%)	59,950 ms	Spadek napięcia
Średnia	5970,46 V (94,7%)		
Maksymalna	6035,62 V (95,8%)		

Z uwagi na to, że rozliczenie z dostawcą odbywa się dekadowo realizowana jest poprawa tego współczynnika poprzez oddawanie mocy biernej pojemnościowej do sieci dystrybucyjnej podczas weekendów, gdy zakłady nie pracują.

Kolejno w wyniku analizy asymetrii napięć zasilających można stwierdzić, że na jej wartość oprócz sieci dystrybucyjnej ma również wpływ obciążenie, co zaobserwowano dla transformatorów T1 i T3, które są zasilane z tej samej linii dystrybucyjnej. Ponadto z porównania asymetrii napięć dla wszystkich trzech transformatorów można stwierdzić, że wartość asymetrii dla linii dystrybucyjnych jest różna.

Kolejno dla przeprowadzonych analiz THD dla napięć i prądów stwierdzono, że podczas normalnej pracy sieci najwyższe wartości tego współczynnika dla napięć i prądów występowały dla transformatora T3 oraz T1. Piki wartości THD dla prądów transformatora T3 dochodziły nawet do 200% natomiast dla przebiegów napięć do niecałych 4%, co stanowi połowę dopuszczalnego limitu dla przebiegów napięć.

Przeprowadzone analizy potwierdzają tezę, że odkształcenia prądów powodują odkształcenia napięć zasilających, czym wpływają na jakość dostaw energii elektrycznej.

Dla współczynników THD dla przebiegów napięć i prądów podczas czynności łączeniowych zarejestrowano piki znacznych wartości, które powodują chwilowe zakłócenia w sieci energetycznej.

Kolejno z analizy krótko i długotrwałych migotań światła (wahań napięcia) można stwierdzić, że dla transformatora T1 i T3 występowały przekroczenia dla wskaźnika P_{st} natomiast dla wskaźnika P_{uv} , który podlega regulacjom prawnym wartości te mieściły się w normie.

Dodatkowo analizując wskaźniki migotania światła można stwierdzić fakt, że ich wartości są uzależnione od charakteru obciążenia, co jest szczególnie widoczne dla transformatora T3. Dla tego transformatora duży wpływ na wahania napięcia ma piec indukcyjny znacznej mocy o nieliniowym charakterze. Wahania te osiągały najwyższe wartości spośród wszystkich trzech transformatorów ze względu na znaczne zmiany wartości płynących prądów.

Podsumowując całość artykułu można stwierdzić, że jakość dostaw energii elektrycznej w dzisiejszych czasach stanowi

jedno z kluczowych zagadnień związanych z dostawą energii elektrycznej do zakładów przemysłowych.

Bibliografia

1. Kołodziej K., *Wpływ charakteru obciążenia z zakładów przemysłowych na parametry jakościowe dostaw energii elektrycznej z linii WN/SN. Wprowadzenie teoretyczne*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 24, Nr 2, 2020, 69–76, DOI: 10.14313/PAR_236/69.
2. Dz. U. z 2007 r. Nr 93, poz. 623, Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
3. Hoevenears T., LeDoux K., Colosino M., *Interpreting IEEE STD 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications*, New York 2003, DOI: 10.1109/PCICON.2003.1242609.
4. Kołodziej K., *Analiza ograniczania wyższych harmonicznych nieliniowych odbiorników przy wykorzystaniu filtra aktywnego*, RUTJEE, zeszyt 37 (1/2018), 49–62, Rzeszów 2018, DOI: 10.7862/re.2018.4.

Impact of the Load Character from Industrial Plants for the Quality Parameters of Electricity Supply from the HV/MV Line Parametric Research

Abstract: The article presents the results of measurements related to the analysis of the parameters of the 110/6 kV power network supplying industrial plants. The tests were carried out on three 6 kV current lines on the secondary sides of three 110/6 kV transformers supplying three sections of the main power point with a total power of 48 MVA. Thanks to the measurements carried out on the secondary sides of three identical 110/6 kV transformers, it was possible to compare the influence of the nature of the load from individual plants on the quality parameters of the supplied electricity. The results of electric energy quality measurements recorded during network traffic and switching operations on 6 kV current lines, as well as the statistics of events are also presented. The article ends with conclusions and a summary of the presented measurements.

Keywords: main power point 110/6 kV, quality of electricity, analysis of power supply parameters, power supply to industrial plants

mgr inż. Kamil Kołodziej

kamil2222pl@wp.pl

ORCID: 0000-0002-3086-5801

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. W 2014 r. uzyskał tytuł inżyniera na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. W 2016 r. uzyskał tytuł magistra na kierunku Elektrotechnika. Od 2016 r. jest doktorantem na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej w dyscyplinie elektrotechnika. Od 2014 r. związany z branżą przemysłową i energetyczną. Główne zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z jakością energii elektrycznej, efektywnością energetyczną a także nowoczesnymi systemami sterowania i nadzoru typu SCADA, BMS, PME stosowanymi w obszarach przemysłowych i energetycznych.

