

Oddziaływanie podstacji trakcyjnej na sieć elektroenergetyczną

Streszczenie. Trakcja elektryczna jest typowym odbiorcą zakłócającym wprowadzającym do sieci zasilającej zaburzenia elektromagnetyczne w postaci odkształcenia prądów i napięć zasilających. W artykule przedstawiono analizę wyników pomiarów wyższych harmonicznych prądu i napięcia wykonanych na poziomie 110 i 15 kV w wybranej podstacji trakcyjnej. Dokonano oceny jakości energii elektrycznej w sieci 110 kV i w sieci 15 kV. Dokonano oszacowania przenoszenia się wyższych harmonicznych pomiędzy sieciami 15 i 110 kV.

Abstract. Electric traction is the typical disturbing load introducing to the power system the electromagnetic disturbances in the form of currents and voltages distortion. In the paper the analysis of current and voltage higher harmonics measurements performed in selected traction substation on 110 and 15 kV level is presented. An evaluation of the power quality in the 110 kV and 15 kV networks and estimate of harmonics transfer between 15 and 110 kV networks have made. **Analysis of current and voltage higher harmonics measurements performed in selected traction substation**

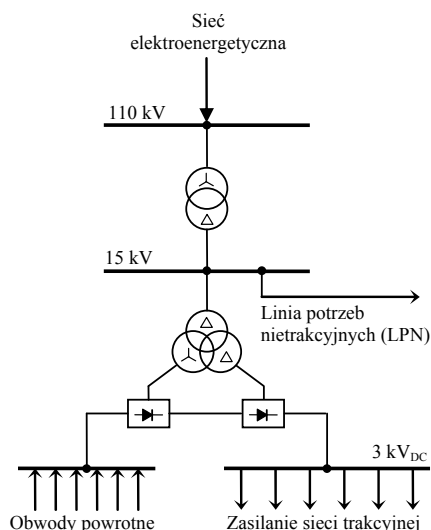
Słowa kluczowe: obciążenie trakcyjne, jakość energii elektrycznej, wyższe harmoniczne prądu i napięcia.

Keywords: traction load, power quality, current and voltage higher harmonics.

doi:10.12915/pe.2014.07.52

Wstęp

Do sieci elektroenergetycznych przyłączone są różne grupy odbiorców energii, eksploatujących różnego rodzaju odbiorniki. Część z nich można uznać za odbiorców zakłócających, wprowadzających do sieci energetycznej zaburzenia elektromagnetyczne w postaci: zapadów napięcia, wahań napięcia, przebiegów przejściowych, przepięć, wyższych harmonicznych itp. Typowym odbiorcą zakłócającym jest trakcja elektryczna. Podstawowymi urządzeniami stosowanymi do przekształcania energii w podstacjach trakcyjnych są zespoły prostownikowe, stanowiące dla sieci elektroenergetycznej obciążenie nieliniowe. Pobierają z sieci zasilającej odkształcone prądy i są przyczyną odkształcenia napięcia [1, 2, 3]. Obciążenia trakcyjne (PKP) zasilane są często z stacji elektroenergetycznych 110/SN. Z rozdzielni średniego napięcia (SN) podstacji trakcyjnych zasilani są również inni odbiorcy (tzw. odbiorcy nietrakcyjni), narażeni na dostawę energii elektrycznej o obniżonej jakości, a w szczególności zwiększone odkształcenie napięcia wyższymi harmonicznymi. Poglądowy schemat podstacji trakcyjnej pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Poglądowy schemat podstacji trakcyjnej

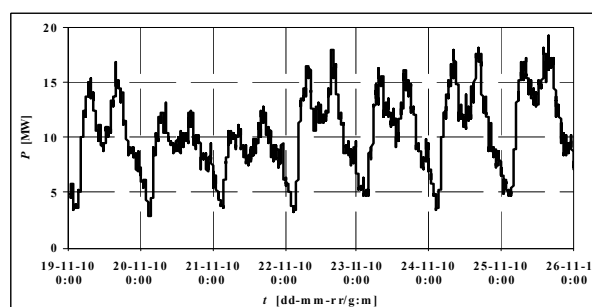
Zespoły prostownikowe stosowane w trakcji elektrycznej wykonywane są coraz częściej jako układy 12-pulsowe. Wymagane jest wtedy zastosowanie trójzwojowego transformatora prostownikowego (rys. 1).

W celu określenia potencjalnego wpływu podstacji trakcyjnych na pracę sieci elektroenergetycznej wykonano badania obciążenia oraz parametrów charakteryzujących jakość energii w wybranej stacji elektroenergetycznej 110/15 kV zasilającej między innymi trzy podstacje trakcyjne w rejonie o dużym natężeniu ruchu kolejowego. W stacji zainstalowane są dwa transformatory 110/15 kV o mocy znamionowej 25 MVA. Układ rozdzielni 15 kV pozwalał na rozdzielenie obciążenia trakcyjnego oraz pozostałych odbiorców i zasilanie ich z oddzielnych transformatorów.

Pomiary wykonano synchronicznie dwoma analizatorami jakości energii elektrycznej typu Fluke 1760 (przyrządy klasy A [4]) zainstalowanymi w polach transformatora zasilającego wydzielone obciążenie trakcyjne po stronie 110 kV i 15 kV. Pomiary przeprowadzono w okresie jednego tygodnia w dniach od 19.11.2010 r. (godz. 0:00) do 26.11.2010 r. (godz. 0:00).

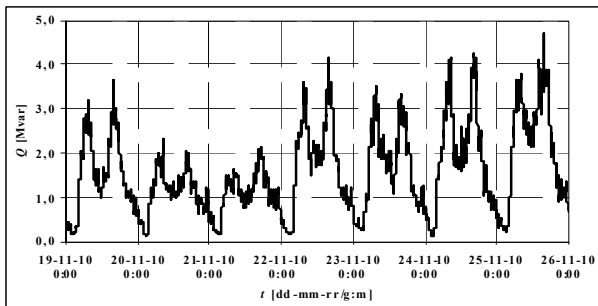
Zmiany obciążenia trakcyjnego w okresie pomiarowym

Zmiany obciążenia trakcyjnego mocą czynną i mocą bierną w okresie pomiarowym mierzone po stronie 110 kV pokazano na rysunkach 2 i 3.

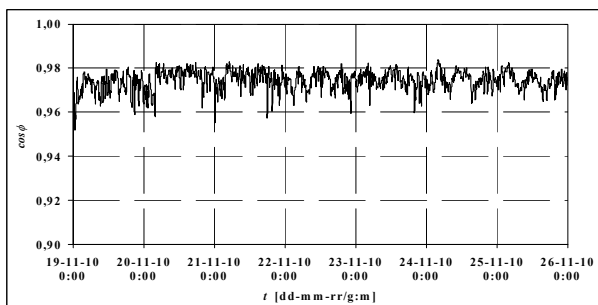


Rys.2. Zmiany obciążenia mocą czynną w okresie pomiarowym

Pobór mocy czynnej zmienia się w zakresie od 2,85 MW (obciążenie minimalne) do 19,23 MW (obciążenie maksymalne), a mocy biernej od 0,1 do 4,7 Mvar, przy wartościach współczynnika mocy $\cos\varphi$ zawartych w przedziale $0,96 \div 0,98$ (rys. 4). Tak szeroki zakres zmian pozwala na dokonanie oceny wpływu obciążenia trakcyjnego na wartości parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej w punkcie przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. Należy też zauważyć powtarzalny, dobowy charakter zmian obciążenia o mniejszych wartościach występujących w okresie weekendu.



Rys.3. Zmiany obciążenia mocą bierną w okresie pomiarowym



Rys.4. Zmiany wartości współczynnika mocy obciążenia trakcyjnego w okresie pomiarowym

Wskaźniki jakości energii elektrycznej

Analizatory jakości energii elektrycznej typu Fluke 1760 są przeznaczone do pomiarów i oceny jakości energii elektrycznej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50160 [5]. Na normie tej oparte zostały także obowiązujące w Polsce przepisy dotyczące jakości energii elektrycznej, ujęte w rozporządzeniu systemowym [6].

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [5, 6], ocenę jakości energii elektrycznej należy przeprowadzać w okresie obserwacji nie krótszym od jednego tygodnia. Wskaźniki jakości mierzone są w sposób ciągły (co pół okresu krzywej napięcia) i uśredniane w przedziałach 10-minutowych. Dla oceny wyników należy porównać percentyle 0,95 uśrednionych wartości parametrów jakościowych z ustalonymi wartościami dopuszczalnymi. Oznacza to, że 95 % wyników pomiarów uzyskanych w okresie tygodnia powinno spełniać wymagania przepisów.

Zgodnie z wymaganiami przepisów jakość energii określana jest poprzez parametry napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia (złącza) instalacji odbiorcy do sieci publicznej, opisane następującymi zależnościami:

- Poziom napięcia:

$$(1) \quad U_{L\%} = \frac{U_L}{U_c} 100\%$$

gdzie: U_c - napięcie deklarowane w złączu sieci elektroenergetycznej (najczęściej równe napięciu znamionowemu sieci), U_L - uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna napięcia zasilającego.

Zmiany wartości skutecznej napięcia zasilającego w sieciach 15 kV według normy PN-EN 50160 [5], a w sieci 110 kV według rozporządzenia systemowego [6] powinny zawierać się w przedziale $\pm 10\%$ napięcia deklarowanego.

- Współczynnik niesymetrii

$$(2) \quad K_{2U} = \frac{U_{2s}}{U_{1s}} 100\%$$

gdzie: U_{1s} - uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna składowej zgodnej napięcia zasilającego, U_{2s} - uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna składowej przeciwnej napięcia zasilającego,

Dopuszczalna wartość współczynnika niesymetrii napięcia w sieci 15 kV według normy [5] wynosi 2 %, a w sieci 110 kV według rozporządzenia [6] jest równa 1 %.

- Względne wartości wyższych harmonicznych napięcia

$$(3) \quad U_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} 100\%$$

gdzie: U_h - uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna h -tej harmonicznej ($h = 1, \dots, 40$) napięcia zasilającego, U_1 - uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna harmonicznej podstawowej napięcia zasilającego.

Dopuszczalne względne wartości wyższych harmonicznych napięcia dla sieci 15 kV według normy [5] podano w tabeli 1, a dla sieci 110 kV według rozporządzenia [6] w tabeli 2.

Tabela 1. Wartości dopuszczalne wyższych harmonicznych napięcia w sieci 15 kV [5]

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
niebędące krotnością 3		będące krotnością 3			
rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$ [%]
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 do 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Tabela 2. Wartości dopuszczalne wyższych harmonicznych napięcia sieci 110 kV [6]

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
niebędące krotnością 3		będące krotnością 3			
rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$ [%]
5	2,0	3	2,0	2	1,5
7	2,0	9	1,0	4	1,0
11	1,5	15	0,5	>4	0,5
13	1,0	>21	0,5		
17	1,0				
19	1,0				
23	0,7				
25	0,7				
>25	$0,2 + 0,5 \frac{25}{h}$				

- Całkowity współczynnik odkształcenia napięcia

$$(4) \quad THD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} 100\%$$

Dopuszczalna wartość całkowitego współczynnika odkształcenia w sieci 15 kV według [5] wynosi 8 %, a w sieci 110 kV według [6] 3 %.

- Długookresowego wskaźnik uciążliwości migotania światła

$$(5) \quad P_{fl} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3}{12}}$$

gdzie P_{st} jest uśrednioną w przedziale pomiarowym wartością krótkookresowego wskaźnika uciążliwości migotania światła.

Dopuszczalna wartość długookresowego wskaźnika uciążliwości migotania światła w sieci 15 kV według [5] wynosi 1, a w sieci 110 kV według [6] wynosi 0,8.

Ocena jakości energii elektrycznej

Zagregowane wyniki pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej w okresie pomiarowym w węzłach sieci 15 i 110 kV zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Porównanie wyników pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej w sieciach 15 i 110 kV

Parametr	Sieć 15 kV				Sieć 110 kV			
	L1	L2	L3	Limit	L1	L2	L3	Limit
U [%]	106,72	106,46	106,47	110,0	110,47	110,55	110,30	110,0
THD_U [%]	11,06	11,37	11,35	8,0	1,41	1,39	1,40	3,0
P_{it} [-]	0,30	0,30	0,30	1,0	0,31	0,31	0,29	0,8
K_{2U} [%]	0,22			2,0	0,25			1,0

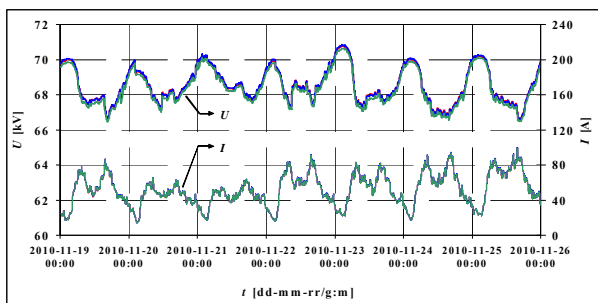
W okresie pomiarowym stwierdzono okresowe przekroczenia wartości dopuszczalnej napięcia występujące w sieci 110 kV w nocnych dolinach obciążenia. Natomiast w sieci 15 kV występują przekroczenia dopuszczalnej wartości przez współczynniki odkształcenia napięć fazowych THD_U .

Natomiast wartości pozostałych parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej, tzn. krótkookresowego (P_{st}) i długookresowego (P_{it}) wskaźnika uciążliwości migotania światła oraz współczynnika asymetrii napięć (K_{2U}) dla obu rozpatrywanych sieci (15 i 110 kV) w całym okresie pomiarowym nie przekroczyły wartości dopuszczalnych określonych przez przepisy [5, 6].

W związku z tym dalsze rozważania poświęcone będą analizie przyczyn przekroczenia wartości dopuszczalnych (wyróżnionych w tabeli 3 pogrubioną czcionką) napięcia w sieci 110 kV i całkowitych współczynników odkształcenia napięcia w sieci 15 kV.

Poziomy napięć

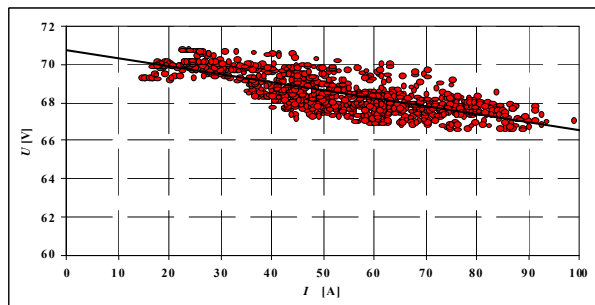
Na rysunku 5 zostały porównane zmiany uśrednionych w przedziałach 10-minutowych wartości skutecznych napięć fazowych na szynach 110 kV ze zmianami uśrednionych wartości skutecznych prądu fazowego transformatora 110/15 kV. Na rysunku tym można zauważyć wyraźną korelację pomiędzy zmianami napięcia i prądu obciążenia. Zmiany wartości napięcia są powodowane przez dobowe zmiany obciążenia. Wzrostowi prądu obciążenia towarzyszy zmniejszanie się wartości napięcia i odwrotnie przy maleniu prądu obciążenia wartość napięcia wzrasta.



Rys.5. Porównanie zmian wartości napięć fazowych na szynach 110 kV oraz zmian wartości prądów fazowych obciążenia w okresie pomiarowym

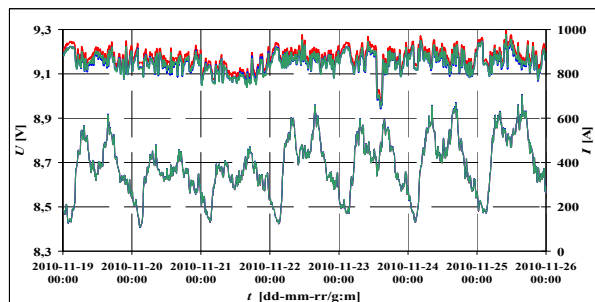
Inaczej zjawiska te przebiegają w sieci 15 kV. Na rysunku 7 przedstawiającym porównane zmiany wartości skutecznych napięć fazowych w sieci 15 kV ze zmianami wartości skutecznych prądu fazowego transformatora po stronie 15 kV wyraźnie widać brak korelacji pomiędzy zmianami napięcia i prądu obciążenia. Można natomiast zaobserwować częste skokowe zmiany napięcia wynikające z działania regulatora napięcia (przełącznika zaczepek pod obciążeniem) zainstalowanego na transformatorze.

Wykorzystując dane przedstawione na rysunku 5 opracowano charakterystyki napięciowo-prądowe dla rozważanego węzła sieci 110 kV. Charakterystykę taką dla fazy L1 pokazano na rysunku 6. W celu określenia wartości napięcia, jakie wystąpiłyby na szynach zasilających bez obciążenia została na tym rysunku wykreślona linia trendu.

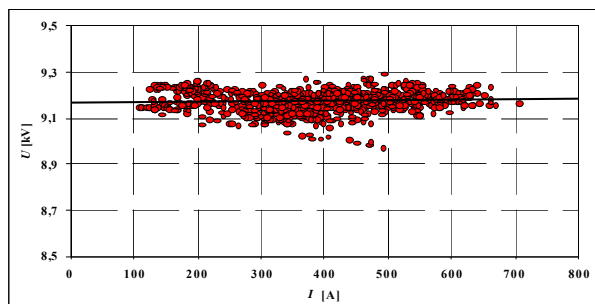


Rys.6. Charakterystyka napięciowo-prądowa sieci 110 kV

Inaczej zjawiska te przebiegają w sieci 15 kV. Na rysunku 7 przedstawiającym porównane zmiany wartości skutecznych napięć fazowych w sieci 15 kV ze zmianami wartości skutecznych prądu fazowego transformatora po stronie 15 kV wyraźnie widać brak korelacji pomiędzy zmianami napięcia i prądu obciążenia. Można natomiast zaobserwować częste skokowe zmiany napięcia wynikające z działania regulatora napięcia (przełącznika zaczepek pod obciążeniem) zainstalowanego na transformatorze.



Rys.7. Porównanie zmian wartości napięć fazowych w sieci 15 kV oraz zmian wartości prądów fazowych obciążenia w okresie pomiarowym

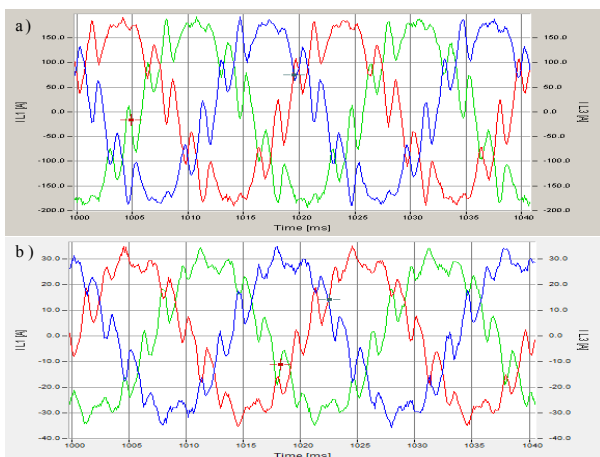


Rys.8. Charakterystyka napięciowo-prądowa sieci 15 kV

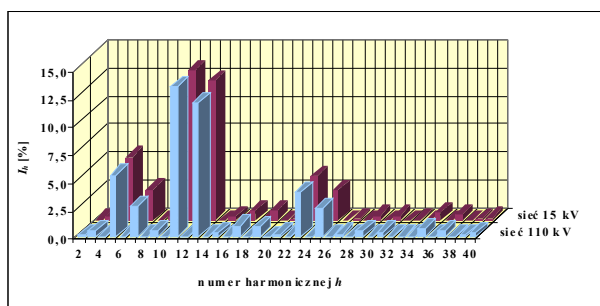
Działanie automatyki przełącznika zaczeptów transformatora widać na rysunku 8, na którym pokazano zależność wartości napięcia fazowego od prądu obciążenia dla fazy L1 reprezentującą charakterystykę napięciowo-prądową sieci 15 kV. Praktycznie płaskie linie trendu pokazane na tych rysunkach świadczą o poprawnej pracy regulatora sterującego pracą przełącznika zaczeptów transformatora, sugerują jednocześnie dużą sztywności sieci zasilającej.

Wyższe harmoniczne napięć i prądów

Głównym obciążeniem transformatora przyłączonym do rozdzielni 15 kV badanej stacji są 3 podstacje trakcyjne wyposażone w 12-pulsowe przekształtniki diodowe. Obciążenie to charakteryzuje się dużą zmiennością w ciągu doby (rys. 2 i 3). Przebiegi prądów pobieranych z sieci zasilającej są silnie odkształcone (rys. 9) z dominującym udziałem 11. i 13. harmonicznej (rys. 10).



Rys.9. Przebiegi chwilowe prądów transformatora po stronie 15 kV (a) i po stronie 110 kV (b)



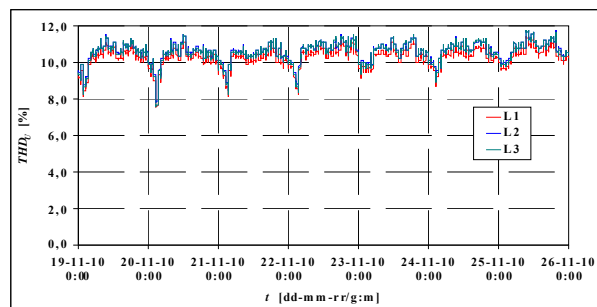
Rys.10. Porównanie względnych wartości wyższych harmonicznych prądu po obu stronach transformatora 110/15 kV

Z punktu widzenia sieci elektroenergetycznej przekształtniki te stanowią źródła prądów wyższych harmonicznych, których widma częstotliwościowe zawierają przede wszystkim harmoniczne o numerach wynikających z zależności $h = 12n \pm 1$ (tzw. harmoniczne charakterystyczne). Występowanie wyższych harmonicznych prądu innych rzędów wynika głównie z niesymetrycznego obciążania się poszczególnych trójfazowych mostków prostowniczych 6-pulsowych, tworzących parami układy 12-pulsowe.

Z porównania przebiegów prądów fazowych po obu stronach transformatora 110/15 kV pokazanych na rysunku 9 oraz z porównania względnych wartości (udziałów) wyższych harmonicznych w tych prądach przedstawionego na rysunku 10 wynika jednoznacznie, że odkształcone przebiegi prądów, prawie dokładnie, są transformowane z sieci 15 kV do sieci 110 kV.

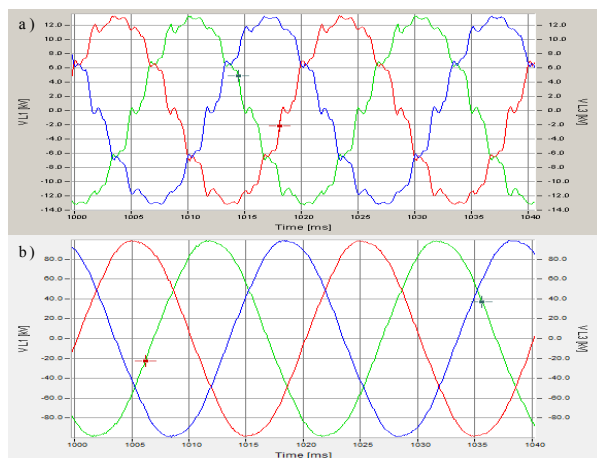
Oczywiście wartości prądów, a co za tym idzie wartości skuteczne poszczególnych wyższych harmonicznych są znacznie mniejsze po stronie 110 kV niż po stronie 15 kV. W związku z tym ich oddziaływanie na sieć zasilającą, a w szczególności na odkształcenie napięcia w sieci 110 kV będzie mniejsze.

Na rysunku 11 pokazano zmiany wartości całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia w sieci 15 kV. Przekroczenia dopuszczalnej wartości THD_U (równej 8 %), trwające praktycznie przez cały okres pomiarów występują we wszystkich fazach.

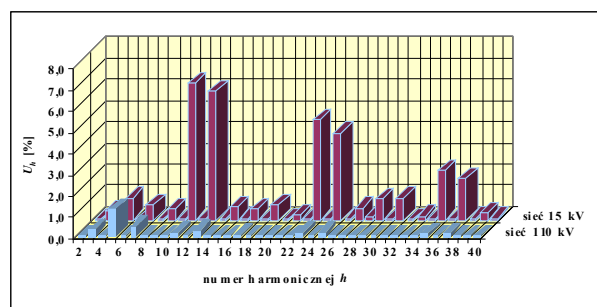


Rys.11. Zmiany wartości współczynnika THD_U trzech napięć fazowych po stronie 15 kV, w okresie pomiarowym

Z porównania przebiegów napięć fazowych po obu stronach transformatora 110/15 kV, pokazanych na rysunku 12, oraz z porównania względnych wartości (udziałów) wyższych harmonicznych w tych napięciach (rys.13) wynika jednoznacznie, że przebiegi napięć fazowych w sieciach 15 i 110 kV różnią się zarówno stopniem odkształcenia przebiegu, jak i składem widma częstotliwościowego wyższych harmonicznych.



Rys.12. Przebiegi chwilowe napięć fazowych po stronie 15 kV (a) i po stronie 110 kV (b) transformatora



Rys.13. Porównanie względnych wartości wyższych harmonicznych napięcia po obu stronach transformatora 110/15 kV

Z porównania rysunków 10 i 13 wynika, że odkształcenie napięcia po stronie 15 kV spowodowane jest obciążeniem trakcyjnym, ponieważ przebiegi napięcia i prądu mają identyczny skład widma częstotliwościowego wyższych harmonicznych i w przebiegach obu wielkości (prądów i napięć) dominują te same wyższe harmoniczne, charakterystyczne dla przekształtników 12-pulsowych.

Inna sytuacja występuje w sieci 110 kV. Udział wyższych harmonicznych wywołanych obciążeniem trakcyjnym jest prawie niewidoczny w widmie częstotliwościowym napięcia, natomiast istotne znaczenie mają harmoniczne 3, 5 i 7 stanowiące tzw. tło odkształcenia wywołane oddziaływaniem wielu różnych odbiorców zasilanych z sieci 110 kV.

Podsumowanie

Z wykonanych pomiarów wynika, że w analizowanym przypadku odkształcenie napięcia na szynach rozdzielni 15 kV (scharakteryzowane przez wartości współczynników odkształcenia napięć fazowych THD_U) przez cały okres pomiarów przekracza wartość dopuszczalną określoną w [1, 2] (patrz: tabela 3 oraz rys. 11). W związku z powyższym niedopuszczalne jest zasilanie z tej sieci innych odbiorców.

Ponadto na podstawie przedstawionych wyżej porównań można stwierdzić, że:

1. Wyższe harmoniczne prądu są transformowane przez transformator z sieci 15 kV do sieci 110 kV z zachowaniem praktycznie takich samych relacji pomiędzy poszczególnymi harmonicznymi a harmoniczną podstawową. Zapewnia to także zachowanie kształtu przebiegów czasowych prądów po obu stronach transformatora,
2. W sieci 15 kV istnieje wyraźna korelacja pomiędzy wyższymi harmonicznymi napięcia i prądu, gdzie w napięciu dominują harmoniczne 11, 13, 23 i 25 będące jednocześnie harmonicznymi charakterystycznymi dla zasilanych urządzeń (12-pulsowych przekształtników

trakcyjnych). Obciążenie trakcyjne jest zatem główną przyczyną odkształcenia napięcia w sieci 15 kV,

3. W sieci 110 kV brak korelacji pomiędzy wyższymi harmonicznymi napięcia i prądu. W prądzie dominują harmoniczne 11, 13, 23 i 25 (harmoniczne charakterystyczne dla zasilanych urządzeń – 12-pulsowych przekształtników trakcyjnych), natomiast w napięciu największe wartości mają harmoniczne 3., 5. i 7., których przyczyną muszą być źródła zaburzeń znajdujące się poza badanym obiektem.

LITERATURA

- [1] Brociek W., Wilanowicz R., Higher harmonics and voltage flickers estimation In transformer station supplying nonlinear load with 12-pulse converter, *Przegląd Elektrotechniczny*, **78** (2005), nr 2, s. 29-32
- [2] Dzieńis W., Badanie jakości energii elektrycznej na szynach zbiorczych SN w podstacjach trakcyjnych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2010, nr 27, s. 49-54
- [3] Skliński R., Dzieńis W., Obliczanie odkształcenia prądu i napięcia na szynach zbiorczych SN podstacji trakcyjnych z 12-pulsowymi zespołami prostownikowymi, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2010, nr 8, s. 3-9
- [4] PN-EN 61000-4-30: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-30: Metody badań i pomiaru. Metody pomiaru jakości energii. PKN, Warszawa, 2009
- [5] PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, PKN, Warszawa 2002
- [6] Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku, w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw nr 93 z dnia 29 maja 2007 r., poz. 623

Autor: dr inż. Ryszard Pawełek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl