

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.103.0005

Yuriy VARETSKY*, Michał GAJDZICA**

ANALIZA WYŁĄCZANIA FILTRÓW HARMONICZNYCH W UKŁADACH ZASILANIA ODBIORNIKÓW PRZEMYSŁOWYCH

Praktyka eksploatacji układów kompensacyjno-filtrujących o złożonej konfiguracji połączeń, zainstalowanych w systemach zasilania odbiorników niekonwencjonalnych pokazała, iż wielokrotne włączenia/wyłączenia technologiczne transformatorów i filtrów harmonicznnych w układzie zasilania są dosyć często przyczyną uszkodzenia elementów składowych obwodu filtrującego. W artykule zbadano wpływ zachodzących procesów przejściowych podczas wyłączeń filtrów harmonicznnych na wartości przepięć generowanych na elementach układu filtrującego oraz stykach wyłącznika mocy. Przeanalizowano również wpływ ponownego zapłonu łuku elektrycznego między stykami wyłącznika oraz obecności równoległych filtrów w układzie na poziomy napięć przejściowych. Analizę zachodzących procesów przejściowych przeprowadzono na modelu, opracowanym w pakiecie Matlab/Simulink.

SŁOWA KLUCZOWE: bateria kondensatorów, dławik filtrujący, filtr wyższych harmonicznnych, kompensator statyczny SVC, proces przejściowy, wyłączenia technologiczne.

1. WPROWADZENIE

Zastosowanie filtrów harmonicznnych o złożonej topologii połączeń znajduje powszechne zastosowanie w systemach zasilania energetyki zawodowej oraz układach przemysłowych. Przyczyną takowej sytuacji jest wzrost instalowanych układów energoelektronicznnych w systemach zasilania, a także elektrycznych urządzeń niekonwencjonalnych typu m.in.: piece łukowe i spawarki łukowe, przekształtniki prądu stałego oraz przemiennego itp. w instalacjach zakładów przemysłowych, powodujących zniekształcenie pobieranych prądów [1]. Podstawowym elementem tak skonfigurowanych obwodów kompensacyjnych jest kilka pojedynczych gałęzi filtrujących, odpowiednio projektowanych oraz strojonych do wybranych częstotliwości rezonansowych. Parametry układu filtrującego oraz ich schemat połączeń są dobierane na podstawie charakterystyk obciążenia nieliniowego, parametrów systemu zasilającego oraz wartości możliwych przepięć i przeciążeń w stanach przejściowych [2, 3]. Jak

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

** TAMEH POLSKA Sp. z o.o. Zakład Wytwarzania Kraków

dowodzi eksploatacja, prawdopodobieństwo uszkodzenia układu filtrującego rośnie ze wzrostem liczby oraz czasu utrzymywania w systemie stanów przejściowych.

Praktyka eksploatacji wskazuje, iż na skutek licznych cykli włączeń i wyłączeń technologicznych urządzeń dużych mocy częstym awariom oraz poważnym uszkodzeniom ulegają elementy składowe układu filtrującego. Przyczyną tego zjawiska są udary prądowe oraz przepięcia generowane w chwili komutacji technologicznych, których amplitudy znacznie przekraczają wartości znamionowe oraz ustalone parametry układu kompensacyjnego. Zbyt częste uszkodzenia elementów filtru, skutkują postojem urządzenia lub ciągów urządzeń, a tym samym generują duże koszty związane ze stratą produkcyjną.

W artykule przeprowadzono analizę porównawczą stanów przejściowych zachodzących w poszczególnych filtrach wyższych harmonicznym układu kompensacyjno-filtrującego kompensatora statycznego SVC typu FC-TCR, skonfigurowanego wyłącznie w oparciu o jednostki filtrujące typu LC, podczas wyłączeń technologicznych filtrów. Określono wpływ wyższych harmonicznym, ponownego zapłonu łuku elektrycznego oraz obecności równoległych jednostek złożonego układu filtrującego na wartości maksymalne amplitud napięć przejściowych na dławikach i kondensatorach poszczególnych filtrów harmonicznym oraz stykach wyłącznika mocy.

2. WYŁĄCZENIA TECHNOLOGICZNE FILTRÓW

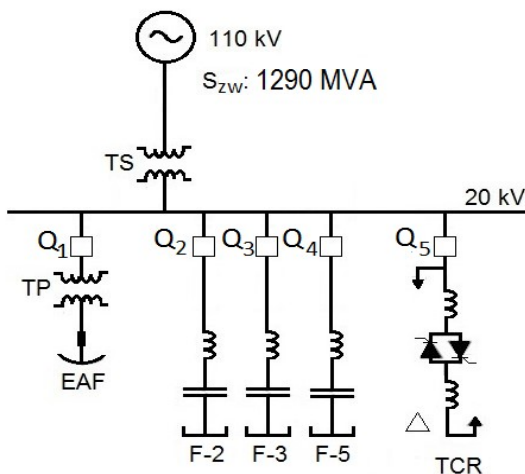
Procesy wyłączania obwodów kompensacyjno-filtrujących w warunkach przemysłowych powodują generowanie stanów przejściowych stwarzających ciężkie warunki pracy wyłączników mocy, jak również całego układu. Rezultatem wyłączeń są przede wszystkim wysokie amplitudy napięć powrotnych powstające w przestrzeni między stykami aparatury łączeniowej, a także przetężenia i przepięcia o charakterze przejściowym, których tłumienie ściśle zależy od pojemności pasożytniczych i dobroci obwodu systemu zasilania. W środowisku o dużej zawartości wyższych harmonicznym prądu nagle komutacje mogą prowadzić do powstawania napięć wysokich częstotliwości, których oscylacje są ściśle uzależnione od parametrów obwodu. W konsekwencji operacje łączeniowe tego typu stanowią przyczynę nieprawidłowego zadziałania zabezpieczeń przepięciowych, a w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do uszkodzenia izolacji elementów kompensatora.

Proces wyłączania filtrów wyższych harmonicznym prowadzi do powstawania wysokich przepięć oraz przetężeń w systemie [4, 5]. Z chwilą gdy prąd przestanie płynąć, nagromadzona w elementach pasywnych układu filtru energia elektryczna ulega szybkiemu rozładowaniu na pojemnościach pasożytniczych układu zasilania, wywołując wysokoczęstotliwościowy proces przejściowy [6]. W konsekwencji między stykami wyłącznika generowane jest szybko narastające napię-

cie przejściowe powrotne (ang. *Transient Recovery Voltage*), co może doprowadzić do ponownego zapłonu łuku. Z tego względu w obwodach filtrów wyższych harmonicznych, mając na celu ograniczenie lub całkowite wyeliminowanie ponownych zapłonów łuku elektrycznego coraz powszechniej znajdują zastosowanie wyłączniki próżniowe oraz z sześćfluorkiem siarki, których budowa oraz przestrzeń gaszeniowa zapewnia odpowiednie warunki do gaszenia łuku elektrycznego. Z kolei mając na celu zapewnienie bezawaryjnej pracy układu kompensacyjno-filtrującego w stanach nieustalonych, prawidłowy dobór poszczególnych parametrów układu filtrującego powinien przebiegać z uwzględnieniem stanów ustalonych oraz przejściowych [2].

3. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU FILTRUJĄCEGO

Układ przemysłowy przyjęty w badaniach tworzą układ kompensacyjny SVC wraz z piecem łukowym AC-EAF zasilanym przez transformator piecowy TP o mocy 50 MVA z szyny średniego napięcia SN. Jednostka pieca łukowego prądu przemiennego oraz układ SVC zasilane są z sieci wysokiego napięcia 110 kV poprzez transformator mocy TS. Układ FC (ang. *Filter Circuit*) występuje jako człón kompensacyjno-filtracyjny SVC. W zależności od struktury (liczby jednostek łukowych) podłączenie całego układu do sieci wysokiego napięcia może odbywać przy pomocy transformatorów systemowych o mocach od 80 do 160 MVA, rysunek 1.



Rys. 1. System zasilania pieca łukowego AC-EAF z układem kompensacyjno-filtrującym

W prezentowanej instalacji przemysłowej, podczas wyłączeń technologicznych jednostek układu FC człón TCR (ang. *Thyristor Controlled Reactor*) pozostaje załączony, zapewniając tym samym bilansowanie mocy biernej na szynie

średniego napięcia. Podczas badań przeanalizowano układ filtrujący FC oparty o filtry proste typu LC: F-2, F-3 oraz F-5 o mocach odpowiednio: 5, 22 i 15 MVA. Podłączenie jednostek filtrujących o parametrach elementów umieszczonych w tabeli 1 do szyny średniego napięcia, wykonano odpowiednio poprzez wyłączniki mocy: Q2, Q3 i Q4.

Tabela 1. Parametry elementów układu FC.

Filtr	Punkt strojenia	Pojemność C [μ F]	Indukcyjność L [mH]	Rezystancja R [Ω]	I_{nom} [A]
F-2	1,86	28,30	103,59	0,27	144
F-3	2,79	152,01	8,57	0,07	632
F-5	4,65	113,90	4,12	0,04	433

4. SYMULACJA PROCESÓW WYŁĄCZENIOWYCH

Celem badań symulacyjnych była analiza wyłączeń układu filtrującego mająca na celu porównanie procesów zachodzących w przypadku pojedynczego wyłączenia filtru w warunkach wyższych harmonicznych oraz wyłączenia filtru w warunkach, gdy w przestrzeni między stykami wyłącznika mocy rejestrowane są ponowne zapłony łuku elektrycznego. Dla analizowanej instalacji przemysłowej możliwe są różne konfiguracje układu kompensacyjnego. Stąd rejestrowane maksymalne amplitudy wartości napięć przejściowych w obwodach poszczególnych jednostek filtrujących oraz wyłącznika mocy, a także przepięć na elementach układu ekwiwalentnego przebadano podczas wyłączania filtrów harmonicznnych w układzie z transformatorem systemowym o mocy 80 MVA.

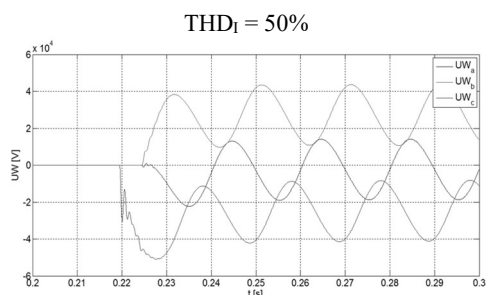
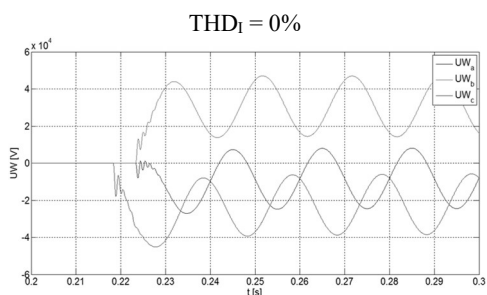
a) Wpływ zawartości prądu harmonicznego filtru na napięcia przejściowe

Wartości maksymalnych amplitud napięć przejściowych filtrów harmonicznnych F-2 oraz F-5 rejestrowanych podczas procesu wyłączenia w modelowanym układzie, w warunkach odkształconego prądu filtru podano w tabeli 2.

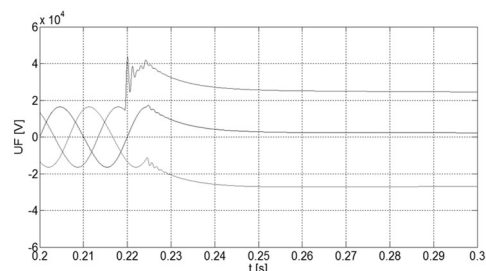
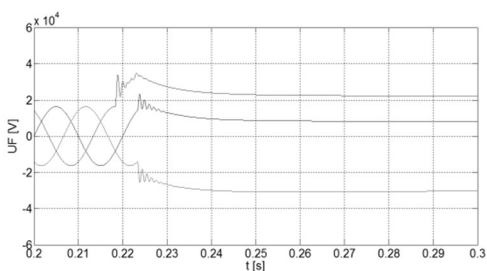
Podczas wyłączania jednostek filtrujących w środowisku wyższych harmonicznnych, wzrost odkształcenia prądu filtru skutkuje zwiększeniem maksymalnych amplitud napięć przejściowych na stykach wyłącznika mocy (U_W), układzie filtrującym (U_F), dławiku (U_L), baterii kondensatorów (U_C) oraz punkcie neutralnym (U_{pn}). Na rysunku 2 porównano oscylogramy prądów oraz napięć przejściowych filtru F-2, w przypadku braku drugiej harmonicznnej w jego prądzie oraz przy wartości drugiej harmonicznnej na poziomie 50%.

Tabela 2. Maksymalne amplitudy napięcia przejściowego w układach wyłączanych filtrów F-2 i F-5 w środowisku wyższych harmonicznych.

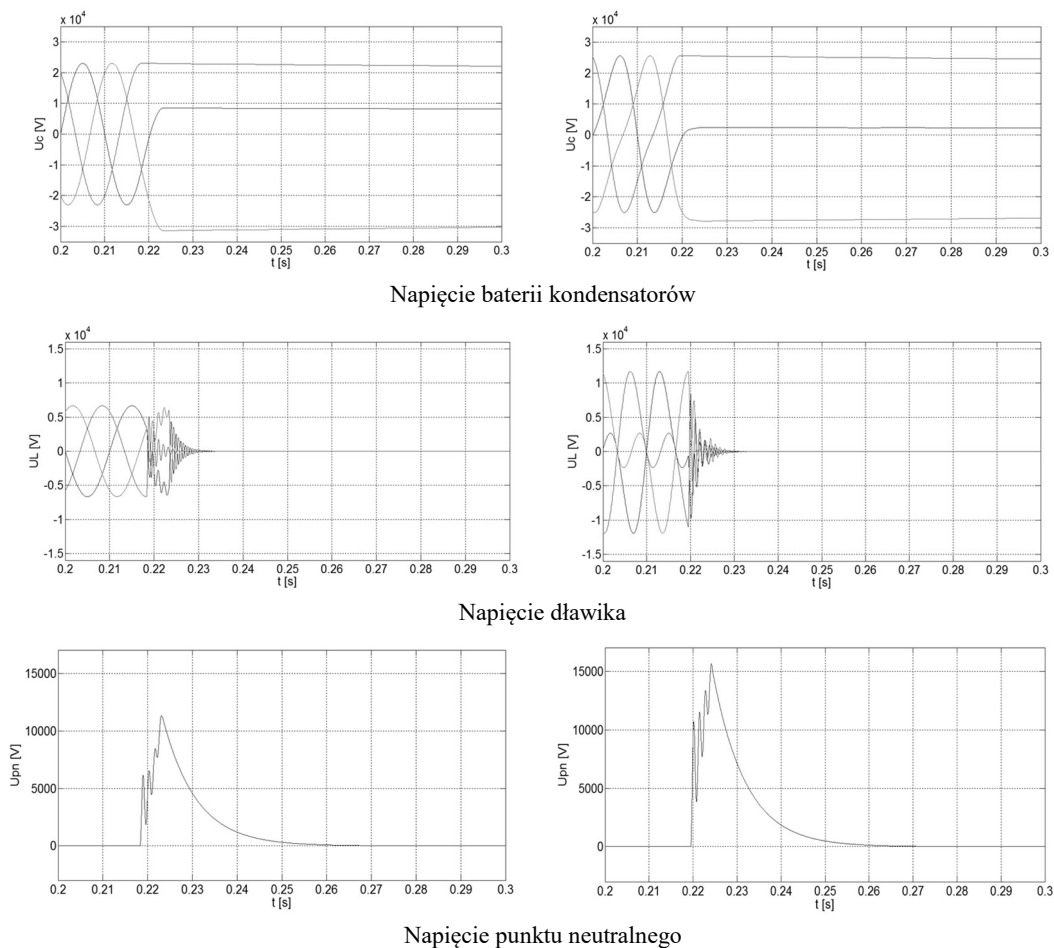
Procent prądu harmonicznej filtru względem prądu 1. harmonicznej	U_W	U_F	U_L	U_c	U_{pn}
	kV	kV	kV	kV	kV
FILTR F-2					
$I_2 = 0$	45,15	34,87	6,68	22,98	11,32
$I_2 = 25$	46,83	37,42	8,14	23,84	12,65
$I_2 = 50$	50,94	43,99	11,01	25,59	15,68
$I_2 = 100$	57,92	50,01	17,64	30,20	17,77
FILTR F-5					
$I_5 = 0$	39,82	26,57	0,03	16,36	10,24
$I_5 = 25$	42,32	29,20	0,08	17,18	12,06
$I_5 = 50$	44,45	31,03	0,12	18,01	13,08
$I_5 = 100$	46,89	33,54	0,25	18,90	14,80



Napięcie na stykach wyłącznika mocy



Napięcie filtru



Rys. 2. Oscylogramy napięć przejściowych podczas wyłączenia filtru F-2

Napięcia rejestrowane na punkcie neutralnym filtru informują o wpływie niejednoczesnego rozchodzenia się styków wyłącznika i zawartości harmonicznych na wartość maksymalnych amplitud. Krotność napięć przejściowych na stykach wyłącznika nie przekracza 3 w przypadku filtru drugiej harmonicznej oraz 2,5 dla filtru piątej harmonicznej względem amplitudy napięcia na szynie w stanie ustalonym.

b) Wpływ ponownego zapłonu łuku elektrycznego na proces wyłączenia filtru

Wartości maksymalnych amplitud przebiegów łączeniowych generowanych na elementach filtrów F-2 oraz F-5, w warunkach ponownego zapłonu łuku elektrycznego między stykami wyłącznika mocy, w środowisku wyższych harmonicznych zaprezentowano w tabeli 3.

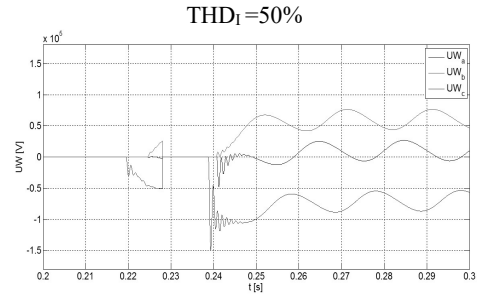
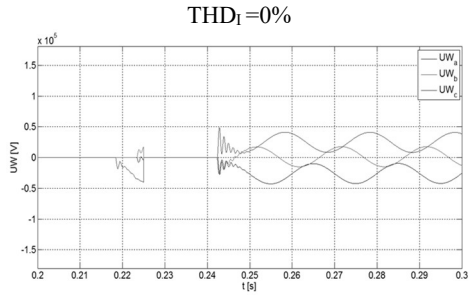
Tabela 3. Maksymalne amplitudy napięcia przejściowego w układach wyłączanych filtrów F-2 i F-5 w środowisku wyższych harmonicznych podczas ponownego zapłonu łuku.

Procent prądu harmonicznej filtru względem prądu 1. harmonicznej	U_W	U_F	U_L	U_c	U_{pn}
	kV	kV	kV	kV	kV
FILTR F-2					
$I_2 = 0$	48,91	46,44	40,17	53,95	11,32
$I_2 = 25$	134,57	150,75	51,36	67,68	46,17
$I_2 = 50$	149,08	164,03	56,45	72,45	51,24
$I_2 = 100$	169,56	183,94	64,13	79,73	58,28
FILTR F-5					
$I_5 = 0$	38,73	24,60	18,66	22,68	8,25
$I_5 = 25$	39,63	25,86	19,70	22,85	8,67
$I_5 = 50$	43,60	28,13	23,17	25,86	9,61
$I_5 = 100$	57,64	38,26	28,71	38,83	10,29

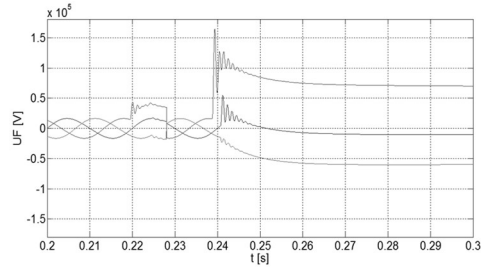
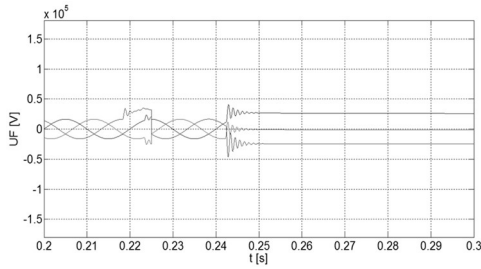
Badania wskazują, iż krotności przepięć rejestrowanych na bateriach filtru drugiej harmonicznej nie przekraczają 4-krotnej, a w przypadku kondensatorów filtru piątej harmonicznej, są mniejsze od 2-krotnej wartości napięcia systemowego. Analiza tabelaryczna uzyskanych wielkości wykazała, iż wzrost poziomu zawartości prądu harmonicznej w układzie filtru powoduje stopniowe zwiększanie wartości maksymalnych przepięć łączeniowych na stykach wyłącznika mocy, w tym również skutkuje przyrostem amplitud napięć przejściowych wyłączanej jednostki filtrującej [4]. Wzrost zawartości odkształceń prądowych i niejednoczesność otwierania się styków wyłącznika mocy potęguje dodatkowo maksymalną amplitudę napięcia punktu neutralnego oraz przepięć na elementach komutującego układu FC.

Na rysunku 3 zaprezentowano oscylogramy prądów oraz napięć przejściowych obwodu filtru F-2, uzyskane podczas wyłączania jednostki układu FC pracującej w środowisku wyższych harmonicznych, w warunkach powtórnego zapłonu łuku elektrycznego. Poszczególne wielkości zestawiono ze sobą dla przypadku, gdy procent prądu harmonicznej w układzie filtru względem wartości prądu 1. harmonicznej wynosi 0% i 50%.

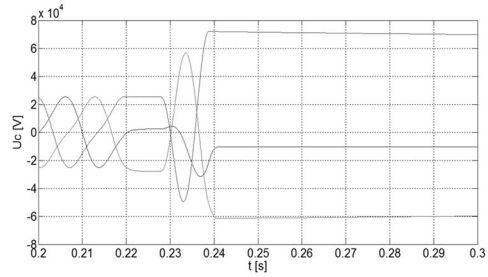
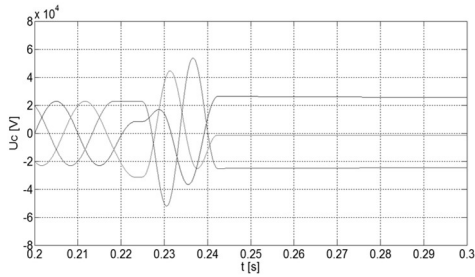
Jak wynika z zaprezentowanych oscylogramów, wyłączenie filtru w warunkach ponownych zapłonów łuku elektrycznego występujących w przestrzeni między stykami wyłącznika, w najbardziej niekorzystnych warunkach może skutkować dużą stromością narastania przepięć na elementach układu ekwiwalentnego. Dla obu przypadków wyłączania nie zaobserwowano wpływu odkształceń harmonicznych na czas tłumienia oscylacji w obwodzie FC.



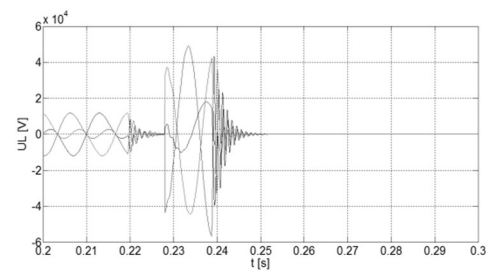
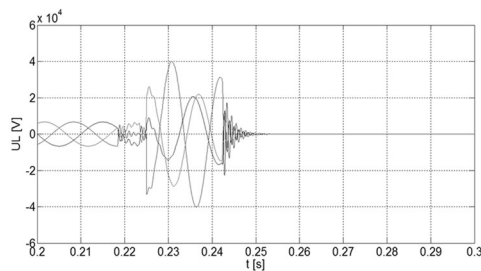
Napięcie na stykach wyłącznika mocy



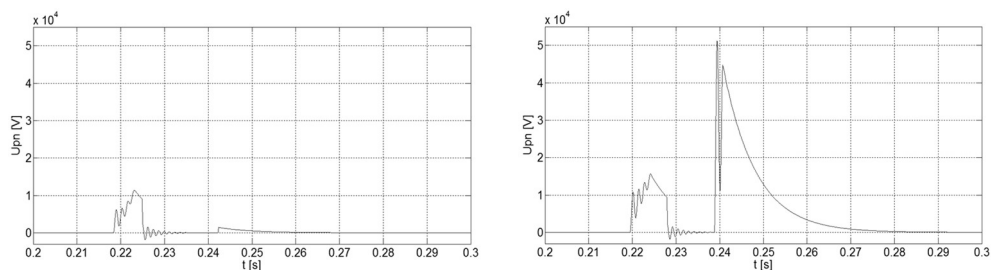
Napięcie filtru



Napięcie baterii kondensatorów



Napięcie dławika



Napięcie punktu neutralnego

Rys.3. Oscylogramy napięć przejściowych podczas wyłączenia filtra F-2, w chwili wystąpienia ponownego zapłonu łuku elektrycznego, w środowisku wyższych harmonicznych

c) Wpływ równoległych filtrów harmonicznych na proces wyłączenia filtru

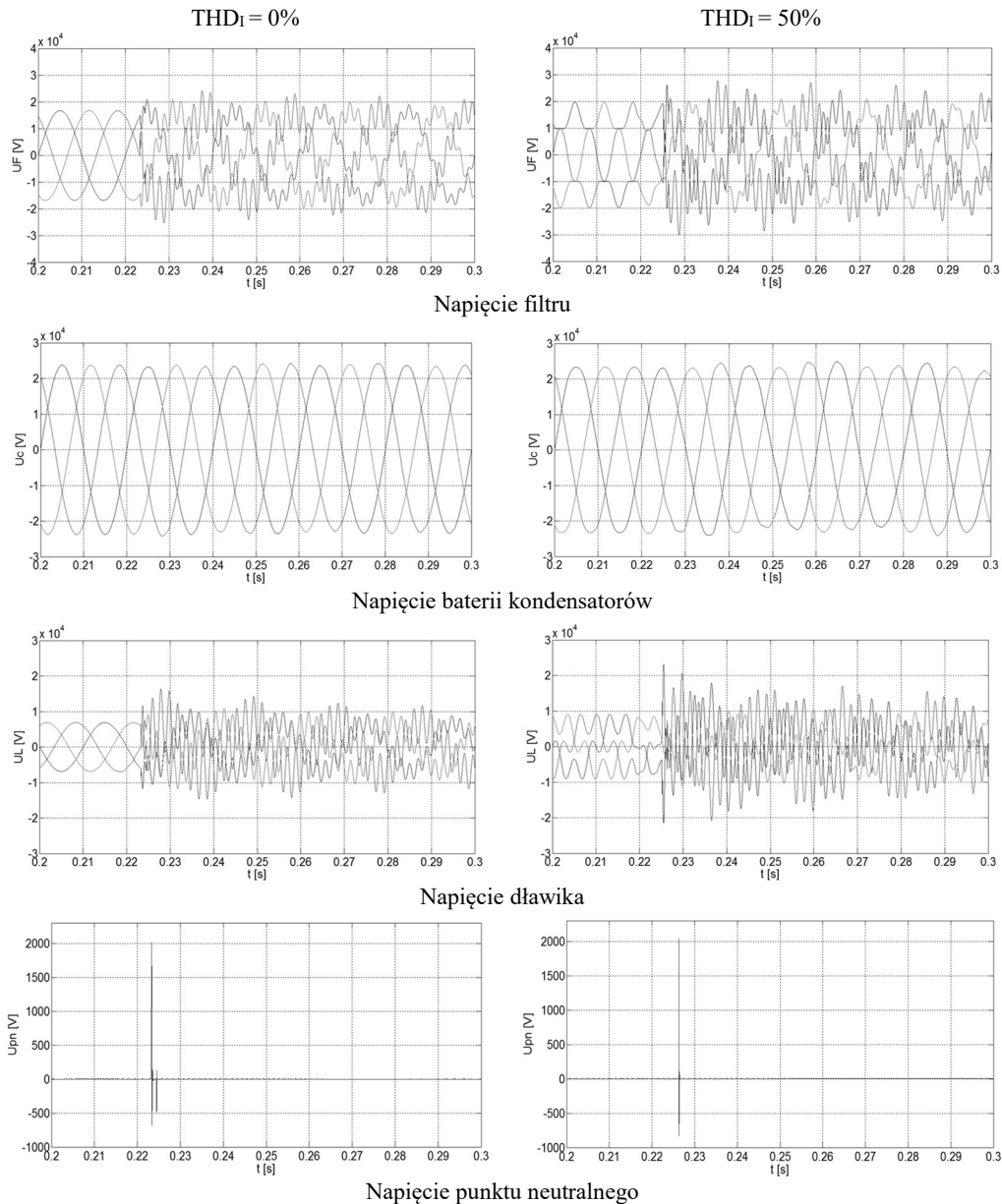
Wpływ wyłączenia filtra piątej harmonicznej w środowisku wyższych harmonicznych na amplitudy napięć przejściowych równoległe pracującego filtra F-2 zaprezentowano w tabeli 4.

Tabela 4. Maksymalne amplitudy napięć przejściowych w układzie filtra F-2, podczas wyłączenia filtra 5. harmonicznej.

Procent prądu harmonicznej filtru względem prądu 1. harmonicznej	U_W	U_F	U_L	U_c	U_{pn}
	kV	kV	kV	kV	kV
FILTR F-2					
$I_2 = 0$	-	25,28	16,32	24,27	2,10
$I_2 = 25$	-	27,08	16,64	24,33	2,13
$I_2 = 50$	-	30,05	23,00	24,63	2,15
$I_2 = 100$	-	35,94	26,70	24,68	2,17
FILTR F-5					
$I_5 = 0$	43,16	25,31	14,06	18,97	8,44
$I_5 = 25$	45,63	27,00	15,16	20,45	8,57
$I_5 = 50$	65,74	34,43	24,37	34,93	8,83
$I_5 = 100$	72,11	51,70	34,34	40,96	9,40

Analiza rejestrowanych amplitud napięć przejściowych obwodu FC, podczas komutacji filtra F-5 dowodzi, iż wzrost poziomu wyższych harmonicznych w obwodzie skutkuje zwiększaniem wartości maksymalnych przepięć powrotnych generowanych na stykach aparatury łączeniowej oraz przepięć łączeniowych na dławikach i kondensatorach zainstalowanych jednostek filtrujących [4].

Na rys. 4 podano oscylogramy napięć przejściowych filtru drugiej harmonicznej, rejestrowanych podczas wyłączania jednostki filtrującej F-5, w warunkach odkształconego napięcia zasilania oraz ponownych zapłonów łuku elektrycznego.



Rys. 4: Oscylogramy prądów oraz napięć przejściowych filtru F-2, podczas wyłączania filtru F-5, w środowisku wyższych harmonicznych

Analiza maksymalnych amplitud napięć przejściowych rejestrowanych w układzie filtrującym prowadzona z chwilą wyłączenia filtra piątej harmonicznej wykazała, iż wartości te są relatywnie mniejsze w porównaniu do przepięć generowanych w przypadku komutacji z pkt. A i B. Stwierdza się, iż w tym przypadku napięcia rejestrowane na punkcie neutralnym układu FC charakteryzują się największą stromością (spośród przeanalizowanych przypadków) oraz są silniej tłumione przez pracujący filtr drugiej harmonicznej, przez co ich amplituda oraz czas oddziaływania w systemie maleje.

5. WNIOSKI

Zrealizowane badania stanów przejściowych informują, iż procesy wyłączenia filtrów harmonicznych skutkują powstawaniem wysokich krotności napięć łączeniowych w obwodzie kompensacyjno-filtrującym. Prezentowana analiza oscylogramów oraz danych tabelarycznych stanowi potwierdzenie, iż obserwowane oscylacje oraz wysokie amplitudy przepięć stanowią realne niebezpieczeństwo dla izolacji baterii kondensatorów oraz dławików filtrujących. Ważnym zagadnieniem jest więc poprawny dobór parametrów układu uwzględniający zarówno stany ustalone, jak i przejściowe.

Uzyskane wyniki świadczą, iż ze zwiększeniem prądu harmonicznej filtru podczas jego wyłączenia wzrastają maksymalne amplitudy napięć przejściowych w układzie kompensacyjno-filtrującym, stwarzając poważnie zagrożenie dla kondensatorów i dławików układu.

Podziękowania. Badania były finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Grant AGH Nr 11.11.210.312).

LITERATURA

- [1] Das J. C., Passive Filters – Potentialities and Limitations, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 1, pp. 232–241, January/February 2004.
- [2] Warecki J., Gajdzica M., Wpływ charakterystyk eksploatacyjnych sieci przemysłowych na dobór parametrów filtrów harmonicznych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 67, 2019, s. 47–51.
- [3] Warecki J., Gajdzica M., Załączanie transformatora pieca łukowego w sieci z układem filtrów wyższych harmonicznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 4, 2015, s. 64–69.
- [4] Warecki J., Pavlyshyn R., Gajdzica M., Harmonic current impact on transient overvoltages during filters switching-off, Przegląd Elektrotechniczny nr 4, 2013, pp. 95–98.
- [5] Warecki J., Gajdzica M., Long lasting transients in power filter circuits, Computer applications in electrical engineering, vol.12, Politechnika Poznańska 2014, pp. 324–333.

- [6] Kusko A., Medora Noshirwan K., Switching of power harmonic filters, Industry Applications Society Annual Meeting, 1994, pp. 941–945.

STUDY OF SWITCHING-OFF HARMONIC FILTERS IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEM

The practice of operating compensation and filtering equipment using for disturbing loads and having a complex configuration has shown that multiple operation switching-on/switching-off of transformers and harmonic filters on the power supply system often cause damage of the filtering circuit components.

The article examines the impact of transients during harmonic filter switching-off on the overvoltages generated on filter components and circuit breaker contacts. The effect of electric arc re-ignition between circuit breaker contacts and the presence of parallel filters in the system on transient voltage magnitudes was also analyzed. The analysis of transients was carried out by a model developed in the Matlab / Simulink package.

(Received: 28.01.2020, revised: 09.03.2020)