

Janusz Rak, Kazimierz Jagiela, Marek Gała, Marian Kępiński
 Politechnika Częstochowska, Częstochowa

WYBRANE PROBLEMY ZWIĄZANE Z KOMPENSACJĄ MOCY BIERNEJ I FILTRACJĄ WH W MODERNIZOWANYCH NAPĘDACH PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH

SELECTED PROBLEMS OF REACTIVE POWER COMPENSATION AND HIGHER HARMONICS FILTERING IN MODERNIZED CONVERTER DRIVES

Abstract: The paper deals with requirements that have to be met in design and modernization of electric converter drives. Technical issues connected with compensation of the reactive power and filtering of higher harmonics of the current, occurring during implementation and operation of the drives, are described using selected examples. One of the problems is increase of the voltage distortion at buses of a medium voltage switching station due to mismatch between the LC filter parameters and the current harmonic spectrum after replacing controlled DC drives of the bar rolling mill with squirrel cage motors with frequency converters. Negative effect of the idle run current compensation circuit of a new dry transformer on valve switching in the controlled rectifier after replacing old oil transformers is also described. Diagrams of supply circuits, waveforms of currents and voltages as well as harmonic spectra illustrating discussed problems are presented and conclusions and recommendations are formulated.

1. Wstęp

Urządzenia i linie technologiczne we współczesnym przemyśle charakteryzują się znaczną ilością napędów, w których silniki będące elementami wykonawczymi złożonych układów sterowania wymagają ciągłej regulacji prędkości, bądź innych wielkości fizycznych charakterystycznych dla danego procesu produkcyjnego. Wymogi takie spełniają przekształtnikowe zespoły napędowe umożliwiające efektywne przetwarzanie energii elektrycznej na mechaniczną z możliwością głębokiej, płynnej regulacji prędkości obrotowej lub liniowej mechanizmów roboczych. W początkowym okresie rozwoju energoelektroniki, w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, stosowano przede wszystkim napędy prostownikowe prądu stałego z uwagi na parametry ruchowe silników DC oraz łatwość tworzenia układów automatycznej regulacji [11]. Współcześnie w nowych aplikacjach powszechnie stosuje się zespoły napędowe typu przemiennik częstotliwości – silnik asynchroniczny klatkowy. Sterowane napędy prądu przemiennego, w trakcie modernizacji istniejących urządzeń technologicznych, zastępują starsze aplikacje zrealizowane na bazie silników prądu stałego. Przemienniki częstotliwości dzięki cyfrowym algorytmom regulacji działającym w czasie rzeczywistym pozwalają kształtować charakterystyki i parametry

ruchowe silników asynchronicznych podobnie jak miało to miejsce w napędach prądu stałego.

2. Uwarunkowania techniczne przy modernizacji napędów przekształtnikowych

Przy doborze napędu przekształtnikowego do określonej aplikacji uwzględniane są oprócz kryteriów ekonomicznych (cena, okres zwrotu nakładów, koszty eksploatacji) przede wszystkim uwarunkowania techniczne. Obejmują one cztery grupy zagadnień mające wpływ na parametry i konstrukcję zespołu napędowego:

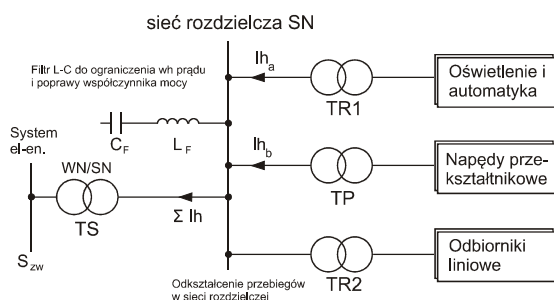
- wymagane parametry procesu technologicznego,
- właściwości eksploatacyjne (niezawodność i sprawność energetyczna),
- oddziaływanie napędu przekształtnikowego na sieć zasilającą w aspekcie jakości energii i kompatybilności elektromagnetycznej,
- wpływ przekształtnika na silnik napędowy z uwzględnieniem toru zasilania.

Wybór struktury przekształtnika i mocy silnika jest determinowany parametrami procesu technologicznego, do których należy zaliczyć [11]:

- wartości maksymalnych momentów, które decydują o wyborze mocy silnika i konfiguracji przekształtnika,
- zakres regulacji prędkości obrotowej lub liniowej,

- konieczność zmian kierunku wirowania wraz z ustaleniem optymalnych wskaźników dynamicznych,
- dokładność pozycjonowania dla niektórych urządzeń technologicznych.

Ważną grupą zagadnień, które należy uwzględnić przy doborze napędu przekształtnikowego jest jego oddziaływanie na sieć zasilającą. Napędy przekształtnikowe są odbiornikami nieliniowymi, które generują wyższe harmoniczne prądu i w konsekwencji powodują odkształcenie napięcia w przemysłowej sieci rozdzielczej.



Rys. 1. Przepływ wyższych harmonicznych prądów w przemysłowej sieci rozdzielczej SN

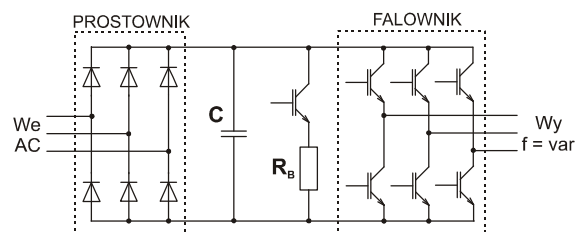
Aby ograniczyć wpływ wyższych harmonicznych prądu na parametry zasilania innych odbiorów pracujących w takiej sieci stosuje się różnorodne środki techniczne (rys. 1). Do podstawowych sposobów należą:

- zasilanie napędów przekształtnikowych dużej mocy z oddzielnych transformatorów,
- stosowanie dławików sieciowych w torze zasilania przekształtnika [9],
- instalacja filtrów pasywnych L-C w węzłach sieci,
- instalacja filtrów aktywnych do eliminacji prądów wyższych harmonicznych.

W przypadku głębokiej regulacji prędkości silnika prądu stałego za pomocą prostownika sterowanego fazowo należy także poprawić współczynnik mocy napędu stosując kompensację mocy biernej. Można w tym celu wykorzystać baterię kondensatorów filtra L-C. Ograniczenie przepływu wyższych harmonicznych prądu ma znaczenie nie tylko dla warunków pracy innych odbiorów, ale także dla sieci przesyłowej i rozdzielczej oraz transformatorów energetycznych, gdyż wyższe harmoniczne powodują w nich dodatkowe straty mocy, nagrzewanie i ograniczenie obciążalności znamionowej [7].

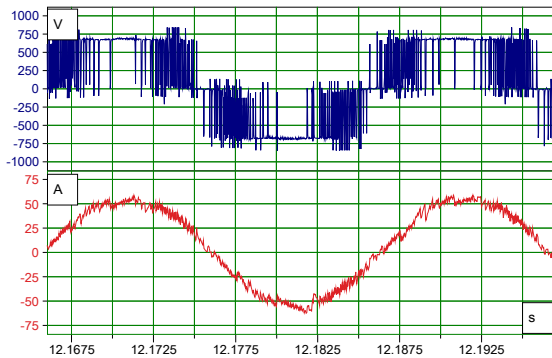
Zastosowanie dławików sieciowych lub transformatorów przekształtnikowych zapewnia ograniczenie stromości narastania prądu zaworów w stanach komutacyjnych oraz wartości prądów zwarciovych w przekształtniku. Dzięki temu możliwa jest właściwa koordynacja zabezpieczeń nadprądowych i skuteczna ochrona zaworów przekształtnika.

Kolejna, odrębna grupa zagadnień, które należy uwzględnić przy projektowaniu lub modernizacji przekształtnikowego zespołu napędowego dotyczy oddziaływania przekształtnika na silnik napędowy wraz z kablami toru zasilania. W przypadku prostownika sterowanego zazwyczaj wystarczy zainstalowanie w obwodzie prądu wyprostowanego dławika wygładzającego o odpowiedniej indukcyjności. Uzyskuje się dzięki temu zmniejszenie składowej zmiennej prądu silnika, a tym samym pulsacji momentu elektromagnetycznego. Natomiast znacznie więcej problemów występuje dla najbardziej obecnie rozpowszechnionego napędu z silnikiem asynchronicznym klatkowym zasilanym z przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia z modulacją PWM i pośredniczącym obwodem prądu stałego o strukturze pokazanej na rys. 2.



Rys. 2. Schemat obwodów siłowych przemiennika częstotliwości

Falownik kształtujący napięcie wyjściowe przemiennika częstotliwości może być sterowany skalarnie lub wektorowo. Zastosowanie zasady modulacji PWM implikuje wysoką częstotliwość łączeń tranzystorów IGBT falownika (do 16 kHz). W rezultacie w fali wyjściowej prądu i napięcia (rys. 3) występują znaczne zawartości składowych harmonicznych oraz duże stromości napięciowe du/dt , co powoduje szereg negatywnych zjawisk w zasilanych maszynach.



Rys. 3. Prąd i napięcie wyjściowe przemiennika częstotliwości napędu wentylatora [9]

Najważniejsze skutki zasilania silnika z przemiennika częstotliwości to:

- przepięcia refleksyjne pojawiające się na zaciskach silnika przy długości kabli łączących go z przemiennikiem większej niż kilkanaście metrów [2, 12, 13, 15],
- niszczenie nieizolowanych łożysk maszyn w wyniku przepływu prądów łożyskowych o częstotliwości impulsów wynikającej z modulacji PWM w falowniku [3],
- skrócenie czasu żywotności silnika związane z przyspieszeniem starzenia się jego izolacji w wyniku przepięć i podwyższonej temperatury pracy [2, 4, 15],
- wytwarzanie hałasu i drgań ze względu na wyższe harmoniczne napięcia [15],
- spadek sprawności silnika [5].

Należy zaznaczyć, że aby ograniczyć emisję zakłóceń elektromagnetycznych w paśmie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz stosuje się ekranowane kable łączące przemiennik z silnikiem. Jednak wówczas rośnie prąd na wyjściu falownika i przy dłuższych kablach ekranowanych należy przewymiarować przemiennik częstotliwości lub zainstalować filtr wyjściowy. Jako filtry wyjściowe stosuje się dławiki du/dt , filtry sinusoidalne (LC) oraz filtry du/dt z VPL (ang. *voltage peak limiter*) [13, 15]. Zasadniczym zadaniem filtrów instalowanych na wyjściu przemienników PWM jest ochrona izolacji zasilanych silników. Warto zaznaczyć, że poza ochroną izolacji silnika filtry wyjściowe dają dodatkowe korzyści w postaci ograniczenia prądów łożyskowych, zmniejszenia nagrzewania silnika oraz obniżenia poziomu hałasu [15].

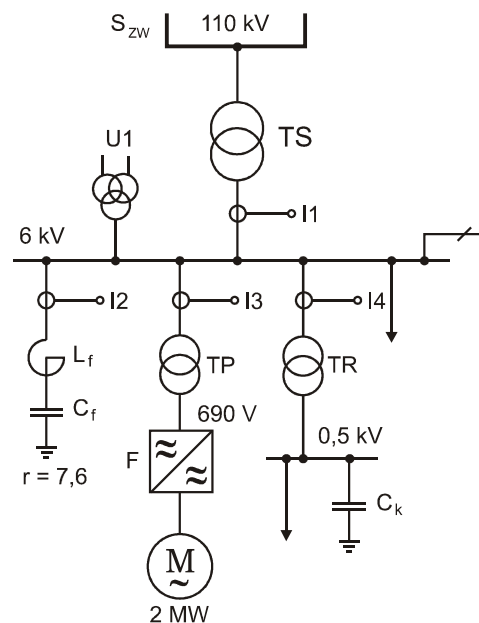
3. Niedopasowanie parametrów filtra w do widma harmonicznego prądu napędu przekształtnikowego AC

Podczas kompleksowej automatyzacji linii walcowania prętów miedzianych przeprowadzono modernizację napędu głównego walcarki polegającą na zamianie układu prądu stałego na napęd przekształtnikowy AC z przemiennikiem częstotliwości zasilającym silnik asynchroniczny. Schemat układu zasilania silnika napędu walcarki przedstawiono na rysunku 4. Silnik klatkowy o mocy 2 MW jest zasilany przez przemiennik częstotliwości F z transformatora TP dołączonego do szyn rozdzielni SN. Parametry impedancyjne toru zasilania napędu walcarki przeliczone na poziom napięcia 6 kV [10] zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1.

Wartości rezystancji i reaktancji elementów składowych systemu zasilania napędu walcarki

System el.-en. $S_{zw}=1375$ MVA	Transformatory		Kabel 6 kV
	TS	TP	
$R_{zw}=3,5$ m Ω	$R_{TS}=12,7$ m Ω	$R_{TP}=0,127$ Ω	$R_k=31$ m Ω
$X_{zw}=28,8$ m Ω	$X_{TS}=0,273$ Ω	$X_{TP}=0,825$ Ω	$X_k=20$ m Ω



Rys. 4. Schemat układu zasilania napędu głównego walcarki z silnikiem AC [8]

Podczas modernizacji napędu w istniejącym jednoślazowym pasywnym filtrze L-C obniżono trzykrotnie wartość pojemności baterii kondensatorów C_f pozostawiając bez zmian dławiki o indukcyjności L_f . Kierowano się zapewne spodziewanym obniżeniem poboru mocy biernej w wyniku zmiany rodzaju silnika i przekształtnika. Parametry filtra po modernizacji dla napędu AC walcarki podano w tabeli 2.

Tabela 2.
Parametry filtra wh dla napędu AC walcarki

Q _C [kvar]	C _f [μF]	L _f [mH]	ω _r [s ⁻¹]	Rząd n _s [-]
413	36,5	4,76	2399	7,64

Zmniejszenie pojemności C_f w filtrze spowodowało zmianę rzędu jego częstotliwości rezonansowej z wartości 4,41 na 7,64 [10]. Rząd n_s rezonansu szeregowego filtra określa wzór (1):

$$n_s = \frac{\omega_s}{\omega_1} = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{L_f C_f}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (1)$$

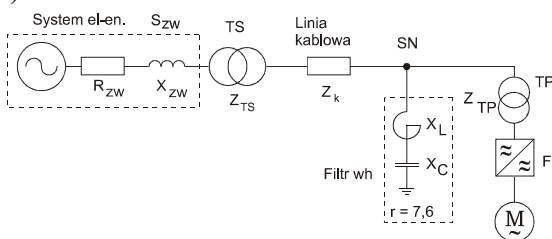
gdzie:

X_L i X_C - wartości reaktancji dławika i baterii kondensatorów obliczone dla f = 50 Hz,

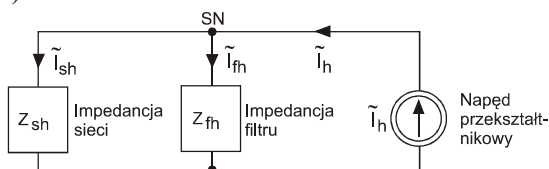
ω₁ - pulsacja dla częstotliwości f = 50 Hz.

W rezultacie pojawiło się niedopasowanie filtra do widma harmonicznego prądu występującego na szynach 6 kV rozdzielni (rys. 4). Ponieważ napęd z przemiennikiem mającym na wejściu sześciopulsowy mostek 6D generuje znaczące harmoniczne prądu rzędów: 5, 7, 11 i 13, a filtr pasywny ma częstotliwość rezonansową rzędu n_s = 7,64, jest to stan niedopuszczalny [14, 16]. Analizę pracy filtra L-C i jego oddziaływania na sieć przemysłową SN przeprowadzono na podstawie pomiarów, wyznaczonych widm harmonicznym przebiegów napięć i prądów [8] oraz obliczeń charakterystyk częstotliwościowych filtra z uwzględnieniem impedancji sieci zasilającej. Schemat zastępczy toru zasilania napędu i równoważny obwód dla harmonicznej rzędu h pokazano na rysunku 5 [1, 4].

a)



b)



Rys. 5. Układ zasilania napędu walcarki z filtrem pasywnym:

a) schemat zastępczy toru zasilania napędu,

b) obwód dla harmonicznej rzędu h.

Impedancje sieci Z_s i filtra Z_f w funkcji częstotliwości mają postać:

$$Z_s(j\omega) = R_s + j\omega L_s \quad (2)$$

$$Z_f(j\omega) = R_f + j(\omega L_f - 1/\omega C_f) \quad (3)$$

Dla harmonicznej rzędu h impedancje Z_{sh} i Z_{fh} pokazane na rysunku 5b wynoszą:

$$Z_{sh} = R_s + jhX_s \quad (4)$$

$$Z_{fh} = R_f + j(hX_L - X_C/h) \quad (5)$$

przy czym przyjęto następujące oznaczenia:

rezystancja sieci R_s = R_{zw} + R_{TS} + R_k, reaktancja sieci X_s = X_{zw} + X_{TS} + X_k (dla 50 Hz).

Rezystancję R_f wyznaczono wg wzoru (6) [4] przyjmując szacunkowo dobroć filtra Q = 100:

$$R_f = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (6)$$

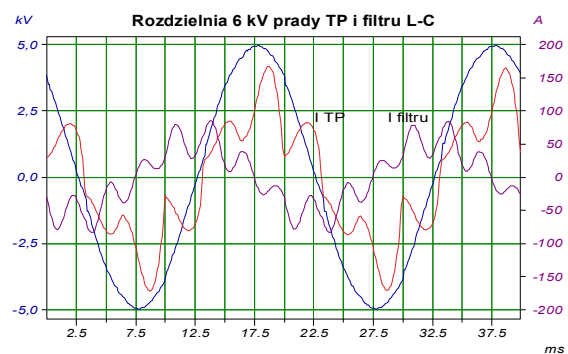
W obwodzie pokazanym na rysunku 5b oprócz rezonansu szeregowego w gałęzi filtra występuje także rezonans równoległy prądów połączonych równolegle impedancji sieci Z_{sh} i filtra Z_{fh} przy częstotliwości poniżej częstotliwości dostrojenia gałęzi L-C [16]. Impedancję Z_{sf} widzianą z zacisków źródła wyższych harmonicznym prądu, jakim jest napęd przeksztaltnikowy, określa następująca zależność [1, 4]:

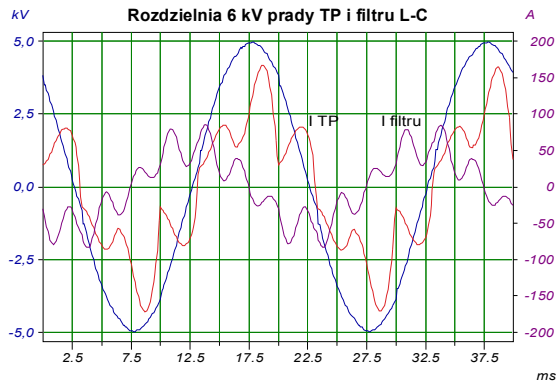
$$Z_{sf} = \frac{Z_s \cdot Z_f}{Z_s + Z_f} \quad (7)$$

Dla harmonicznej rzędu h po podstawieniu zależności (4) i (5) otrzymuje się:

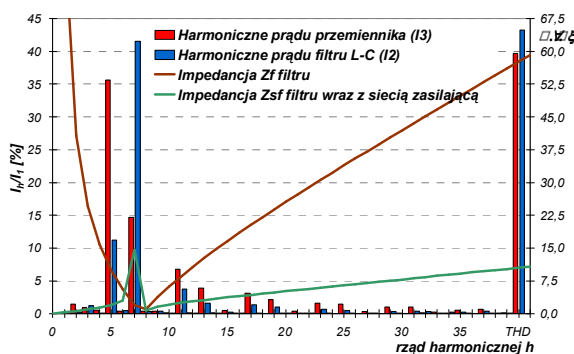
$$Z_{sf}(h) = \frac{(R_s + jhX_s)[R_f + j(hX_L - X_C/h)]}{R_s + R_f + j[h(X_s + X_L) - X_C/h]} \quad (8)$$

Na rysunku 6 pokazano fragment zarejestrowanych w rozdzielni SN przebiegów: napięcia U_I na szynach 6 kV, prądu I₃ transformatora TP przemiennika i prądu I₂ filtra L-C [8]. Wyznaczone na podstawie zależności (5) i (8) charakterystyki impedancyjne w funkcji rzędu h oraz względne spektra harmonicznym dla przebiegów prądu transformatora TP przemiennika i prądu filtra zamieszczono na rysunku 7.





Rys. 6. Przebiegi napięcia, prądu filtru L-C i transformatora TP po stronie SN [8]



Rys. 7. Względne widma harmonicznych prądu przemiennika i filtru oraz charakterystyki impedancyjne filtru i filtru wraz z siecią zasilającą

Przebieg modułu impedancji Z_{sf} w funkcji rzędu harmonicznej h wykazuje lokalne maksimum w pobliżu wartości 7. Odpowiada to częstotliwości ω_r rezonansu równoległego prądów, której rząd n_r , przy pominięciu rezystancji R_s i R_f , można wyznaczyć z zależności (9):

$$\frac{1}{jn_r X_s} + \frac{1}{jn_r X_L - j \frac{1}{n_r} X_C} = 0 \quad (9)$$

Po przekształceniach otrzymuje się wzór (10):

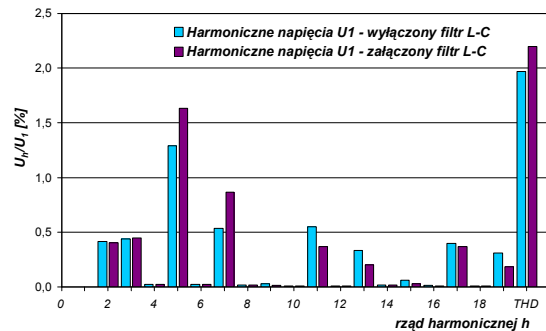
$$n_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_s + X_L}} = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{(L_s + L_f) C_f}} \quad (10)$$

Wyliczona wg (10) wartość n_r wynosi 6,97. Do oceny stopnia oddziaływania filtru pasywnego na jakość energii na poziomie SN wyznaczono wybrane wskaźniki elektroenergetyczne obciążenia TS dla różnych konfiguracji układu zasilania [8] i wyniki zamieszczono w tabeli 3.

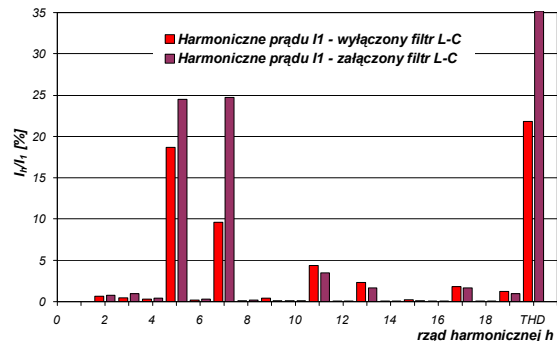
Tabela 3.
Wskaźniki elektroenergetyczne obciążenia TS dla różnych konfiguracji układu zasilania

Konfiguracja układu zasilania	D/P [%]	tgφ [-]	THD _{I1} [%]	THD _{U1} [%]
Filtr wył.; C _k wył.	22,5	0,38	21,9	1,97
Filtr zał.; C _k wył.	34,5	0,062	35,2	2,2
Filtr wył.; C _k zał.	22,7	0,184	23,5	1,9
Filtr zał.; C _k zał.	32,8	-0,138	33,7	2,4

a)



b)



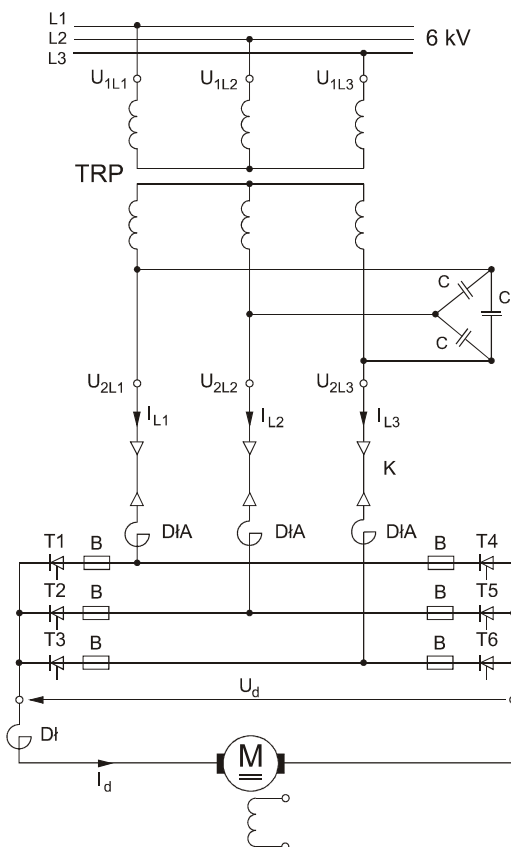
Rys. 8. Harmoniczne napięcia U_1 i prądu I_1 transformatora TS po stronie 6 kV

Na rysunkach 8a i 8b pokazano rozkłady harmonicznych zarejestrowanych przebiegów napięcia i prądu po stronie 6 kV transformatora TS wraz ze współczynnikami zniekształceń napięcia THD_U i prądu THD_I przy włączonym i wyłączonym filtrze L-C oraz wyłączonej baterii kondensatorów C_k po stronie nn TRP.

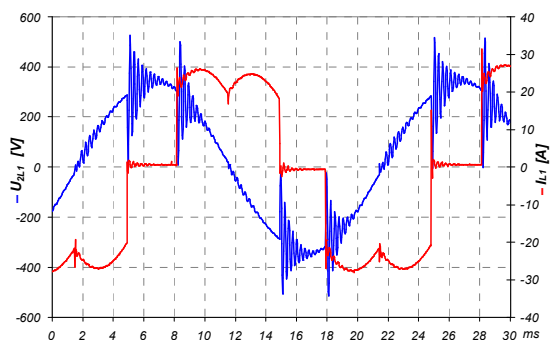
Zamieszczone w tabeli 3 wskaźniki i rozkłady harmonicznych wykazują, że filtr L-C niedopasowany do widma harmonicznych obciążenia powoduje wzrost 5 i 7 harmonicznej w prądzie obciążenia transformatora TS, a w konsekwencji wzrost wskaźnika THD_U na poziomie 6 kV co wpływa niekorzystnie na pracę pozostałych odbiorów zasilanych z tej rozdzielni. Zaleca się wyłączenie na stałe filtru L-C i kompensację mocy biernej za pomocą baterii C_k .

4. Wpływ układu kompensacji biegu jałowego transformatora na komutację zaworów w prostowniku sterowanym

Interesujący problem pojawił się podczas wymiany transformatora przekształtnikowego TRP napędu samotoku w linii walcowniczej pokazanego na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat zasilania silnika prądu stałego napędu samotoku hutniczego z układem kompensacji prądu biegu jałowego transformatora przekształtnikowego [6]



Rys. 10. Przebiegi napięcia i prądu fazy L1 transformatora TRP po stronie nn

Przy próbach uruchomienia napędu prądu stałego z prostownikiem sterowanym pracował on niestabilnie i ulegały uszkodzeniu bezpieczniki

szybkie. Stwierdzono, że przyczyną tego są oscylacje (rys. 10), które powstają w równoległym obwodzie rezonansowym (indukcyjność uzwojenia transformatora – kondensator C – dławiki komutacyjne D1A) podczas komutacji zaworów przy wymuszeniu prądowym [16].

5. Podsumowanie

Przedstawiony w artykule przykład dotyczący pogorszenia jakości energii w przemysłowej sieci SN dowodzi, że przy modernizacji napędów przekształtnikowych i wynikającej z tego zmiany zapotrzebowania na moc bierną należy zwrócić uwagę na możliwość wystąpienia rezonansów przy zmianie pojemności baterii kondensatorów, zwłaszcza jeśli są one elementem pasmowego filtra biernego. Konieczne jest wówczas przeprowadzenie analizy struktury sieci, zidentyfikowanie częstotliwości rezonansowych i porównanie ich z widmem harmonicznych generowanym przez obciążenie.

W przypadku transformatorów suchych wyposażonych w układ do kompensacji prądu biegu jałowego w postaci zespołu kondensatorów należy je odłączać stycznikiem (kategoria AC6b) podczas pracy zasilanego przekształtnika (prostownik, przemiennik lub sterownik napięcia).

6. Literatura

- [1]. Baggini A. (red): *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons, Ltd. England 2008.
- [2]. Basavaraja B., Sarma V.S.S.: *Analysis of the overvoltages in PWM-inverter fed induction motors*. Tencon 2008, IEEE Region 10 Conference, pp. 1-6.
- [3]. Chen S., Lipo T.A., Fitzgerald D.: *Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 25-32.
- [4]. Fuchs E.F, Masoum M. A.S.: *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Academic Press, 2008.
- [5]. Gała M., Jagieła K., Kępiński M., Rak J.: *Oddziaływanie dużych napędów przekształtnikowych prądu stałego na parametry eksploatacyjne silników asynchronicznych*. Napędy i sterowanie, Nr 11/2008, s. 48-53.
- [6]. Jagieła K., Gała M., Kępiński M., Rak J.: *Wykonanie badań i analizy układu pracy transformatorów zawierających PCB znajdujących się na terenie zakładu WBG ISD Huta Częstochowa*. Raport końcowy. Częstochowa 2010 (oprac. niepublikowane).
- [7]. Jagieła K., Rak J., Gała M., Kępiński M.: *Straty mocy w transformatorach energetycznych zasilających dużych odbiorców przemysłowych*. Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój, nr 3/2011, s. 46-56.

- [8]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M.: *Ocena jakości energii elektrycznej pobieranej przez urządzenia technologiczne Huty Miedzi „Cedynia”*. Częstochowa 2001 (oprac. niepublikowane).
- [9]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M.: *Znaczenie dławików w układach napędowych z przemiennikami częstotliwości*. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne, Nr 69/2004, s. 83-87.
- [10]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M., Gała M.: *Wpływ rodzaju silników na parametry elektroenergetyczne napędu walcarki prętów miedzianych*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Nr 71/2005, Katowice, s. 65-70.
- [11]. Jagieła K., Rak J., Śraniowski J., Węgrzyn A.: *Układy energoelektroniczne stosowane w polskim przemyśle hutniczym*. Konf. EZP'2000, t. I, s. 41-52.
- [12]. Leggate D., Pankau J., Schlegel D.W., Kerkmann R.J., Skibinski, G.L.: *Reflected waves and their associated current*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 6, 1999, pp. 1383-1392.
- [13]. Moreira A.F., Lipo T.A., Venkataramanan G., Bernet S.: *High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 5, 2002, pp. 1297-1306.
- [14]. PN-EN 61642: 2001, Sieci przemysłowe prądu przemiennego zakłócone przez harmoniczne. Zastosowanie filtrów i kondensatorów do równoległej kompensacji mocy biernej.
- [15]. Pozowski A., Krawiec H.: *Wpływ filtrów wyjściowych napięciowych falowników częstotliwości na pracę silników indukcyjnych klatkowych*. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne, Nr 85/2010, s. 65-70.
- [16]. Strzelecki R., Supronowicz H.: *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.