

Zasilacz sieciowy z przestrajalnym filtrem indukcyjnym

Streszczenie. W artykule zaprezentowano rozwiązanie zasilacza sieciowego z przestrajalnym filtrem indukcyjnym, który odznacza się dodatkowo możliwością aktywnej kompensacji mocy biernej i mocy odkształcenia, generowanej przez inne odbiorniki dołączone do tego samego węzła sieci elektroenergetycznej. Użyty w układzie pasywny filtr, w postaci cewki o zmiennej indukcyjności, pozwala na uzyskanie dużej dynamiki zmian prądu wejściowego zasilacza, co znacząco poprawia jakość procesu kompensacji. W artykule zaprezentowano zasadę działania zasilacza oraz struktury i modele jego układów sterowania i silnopiędowego. Przedstawiono również wybrane wyniki badań modelu symulacyjnego układu w różnych warunkach jego pracy.

Abstract. The article presents the solution of the power supply with a tunable inductive filter. The power supply is characterized additionally by the possibility of compensation of both reactive power and deformation power, generated by other loads connected to the same power grid node. The passive filter with tuned inductance is used in the system for obtaining a high dynamics of the input current of the power supply. This one significantly improves the quality of compensation process. The article presents the principles of the system operation as well as the structure of the control circuits and the power stage of the system. Selected results of the tests of the system simulation model, for various operating conditions, are presented too. (**Power supply with tunable induction filter**).

Słowa kluczowe: moc bierna, moc odkształcenia, PFC, przestrajalny filtr indukcyjny, zasilacz sieciowy.

Keywords: distortion power, PFC, power supply, reactive power, tunable induction filter.

Wstęp

Negatywny wpływ odbiorników nieliniowych na pracę sieci elektroenergetycznej jest szeroko znany i udokumentowany wieloma opracowaniami, np. [1-5]. Przykładowo, szeroko stosowane, konwencjonalne rozwiązania układów prostownikowych – diodowych i tyrystorowych – pobierają silnie odkształcony prąd, co wiąże się z ich negatywnym oddziaływaniem na sieć, powodując m.in.: odkształcanie napięcia, zmniejszenie przepustowości linii, czy zmniejszenie sprawności przesyłu energii. Stosowane powszechnie środki zapobiegawcze to głównie filtry (aktywne i pasywne), realizujące jednak w systemie elektroenergetycznym tylko jedną, wyspecjalizowaną, funkcję. A zatem, spotykane w literaturze (technice) rozwiązania układów służących poprawie jakości energii nie realizują pewnych funkcji kompleksowo. Skupiają się one np. na aktywnej kompensacji równoległej lub szeregowej – bez możliwości zasilania zewnętrznych odbiorników, lub realizują taką kompensację w ograniczonym zakresie, np. wyłącznie mocy biernej [2].

Przedmiotem niniejszej pracy jest metoda aktywnej kompensacji równoległej mocy biernej i mocy odkształcenia przy użyciu zasilacza sieciowego o regulowanej (stabilizowanej) wartości napięcia wyjściowego [7], [8-10]. Elementem nowości w proponowanym rozwiązaniu – w stosunku do innych układów tego typu prezentowanych w literaturze – jest zastosowanie w jego wejściowej części silnopiędowej przestrajalnego filtra indukcyjnego w postaci dławika. Jego rolę przedstawiono szczegółowo w kolejnych rozdziałach artykułu. W związku z tymi zadaniami niezbędne było opracowanie części silnopiędowej oraz układu sterowania zasilacza tak, aby: umożliwić pobór z sieci mocy czynnej o odpowiedniej wartości (zgodnie z wymaganiami stawianymi przez odbiornik na wyjściu DC zasilacza), realizować kompensację przesunięcia fazowego prądu pobieranego z sieci względem napięcia oraz zadawać kształt tego prądu. Zasilacz ma więc za zadanie m.in. odpowiednie dopasowanie kształtu prądu na swoim wejściu do prądu pobieranego z tego samego węzła sieci przez inne odbiorniki. W wyniku tak rozumianego procesu kompensacji sumaryczny prąd pobierany z węzła sieci winien mieć kształt sinusoidalny i być w fazie z napięciem (ew. jego podstawową harmoniczną).

W niniejszej pracy przedstawiono zasadę działania proponowanego rozwiązania zasilacza-kompensatora oraz wybrane wyniki badań modelu symulacyjnego systemu elektrycznego z jego udziałem.

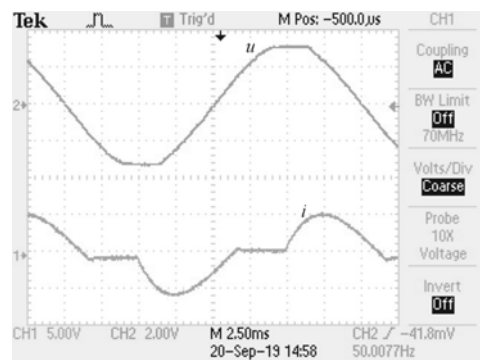
Zasada działania zasilacza sieciowego z przestrajalnym filtrem indukcyjnym

Wyższe harmoniczne prądu, przepływając przez elementy sieci elektroenergetycznej, wywołują na nich spadki napięcia (ΔU_n), które można opisać następującą zależnością

$$(1) \quad \Delta U_n = I_n Z_n : n = 2, 3, \dots$$

gdzie: I_n – wartość skuteczna n -tej harmonicznej prądu, Z_n – impedancja sieci elektroenergetycznej dla n -tej harm.

W konsekwencji, w sieci elektroenergetycznej występują szereg negatywnych zjawisk [6], z których najważniejsze to: zwiększenie strat mocy, ograniczenie jej przepustowości i generacja zaburzeń elektromagnetycznych. Jednym z ich bezpośrednich skutków jest obniżenie czasu życia zarówno samej sieci, jak i odbiorników do niej dołączonych (również tych, które nie wpływają negatywnie na jej pracę). Elementy te, oprócz technicznego, mają również aspekt czysto ekonomiczny. Przykładowe przebiegi napięć i prądów w „miękkiej” sieci elektroenergetycznej, do której dołączono odbiornik o znacznej nieliniowości, pokazano na rys. 1.



Rys.1. Rzeczywiste przebiegi w postaci napięcia sieci i prądu odbiornika o znacznej nieliniowości

Schemat blokowy prezentowanego systemu elektrycznego przedstawiono na rysunku 2. Składa się on z następujących elementów:

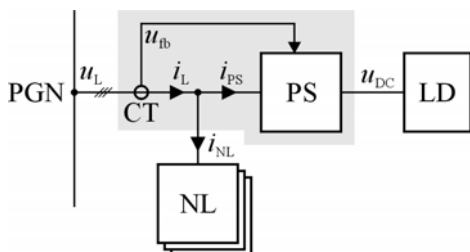
- PGN – węzła sieci elektroenergetycznej,
- PS – zasilacza sieciowego (będącego obiektem prac),
- CT – zestawu, w przypadku sieci 3-fazowej, trzech przetworników pomiarowych prądu,
- NL – grupy odbiorników nieliniowych (t.j. innych urządzeń dołączonych do tego samego, co zasilacz, węzła sieci),
- LD – odbiornika na wyjściu zasilacza sieciowego.

Należy zaznaczyć, że przetworniki pomiarowe prądu, pozwalające układowi sterowania pracą zasilacza śledzić kształt prądu pobieranego z sieci, formalnie są funkcjonalną jego częścią.

Żądany, wypadkowy, prąd i_L pobierany z sieci przez system opisany jest następującą zależnością

$$(2) \quad i_L = i_{NL} + i_{PS} = A_L \sin(\omega_L t)$$

gdzie: i_{NL} – sumaryczny prąd grupy odbiorników nieliniowych, i_{PS} – prąd wejściowy zasilacza sieciowego, A_L i ω_L – odpowiednio, amplituda i pulsacja prądu i_L .



Rys.2. Schemat blokowy systemu elektrycznego z zasilaczem sieciowym (PS), współpracującym z innymi odbiornikami energii elektrycznej (NL)

Zasilacz sieciowy generuje na swoim wejściu odkształcony (w ogólności) prąd, który, sumując się z prądem odbiorników nieliniowych, daje sumaryczny prąd pobierany z sieci o kształcie sinusoidalnym oraz będący w fazie z napięciem sieci (ew. jego podstawową harmoniczną). W efekcie, negatywne oddziaływanie odbiorników nieliniowych (t.j. bloku NL) na sieć elektroenergetyczną zostaje wyeliminowane, a w układzie rzeczywistym – zminimalizowane. Działanie układu jest zatem zgodne z funkcją PFC.

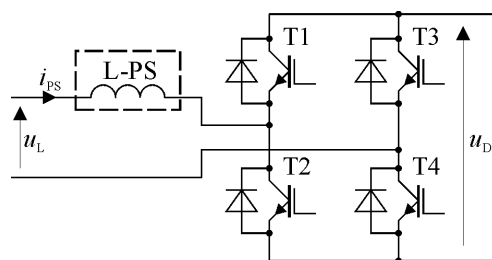
Struktura części wejściowej zasilacza

W bieżącym stadium realizacji projektu system bazuje na 1-fazowej sieci elektroenergetycznej.

Obwód wejściowy zasilacza sieciowego składa się klasycznego mostka tranzystorowego typu H z filtrem indukcyjnym (L-PS) na wejściu (rys. 3). Oba te bloki tworzą energoelektroniczne sterowane źródło prądu, którego zadaniem jest nie tylko zapewnienie wymaganej wartości napięcia w obwodzie DC (u_{DC}) zasilacza, do którego dołączony jest odbiornik „główny” (LD), ale także aktywna kompensacja przesunięcia fazowego i wyższych harmoniczných prądu pobieranego przez odbiorniki nieliniowe (NL). Rola filtra jest przy tym dwójaka – zwiększa on impedancję wejściową źródła prądu oraz minimalizuje amplitudy składowych prądu wejściowego związane z modulacją impulsową [13, 14].

W celu zwiększenia pasma przenoszenia źródła prądu zaproponowano zastosowanie filtra indukcyjnego (w postaci dławika) o zmiennej wartości indukcyjności. Rozwiązanie to

pozwała na większe zbliżenie kształtu prądu sieci do przebiegu „idealnego” – narzuconego przez (2) (w sytuacji dużej dynamiki zmian prądu generowanego przez odbiorniki nieliniowe) – w stosunku do źródła prądu o stałej wartości indukcyjności filtra. Jednocześnie, w stanach ustalonych, stopień minimalizacji amplitud składowych związanych z nośną modulacją impulsowej w prądzie źródła pozostaje nadal wysoki.



Rys.3. Schemat ideowy wejściowej części silnoprądowej zasilacza sieciowego

Dynamika zmian prądu wejściowego zasilacza narzucona jest następującym wzorem

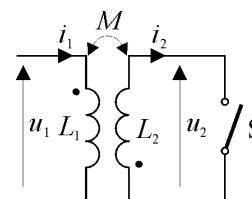
$$(3) \quad i_{PS}(t) = \frac{1}{L_{PS}} \int [u_{DC}(t) - |u_L(t)|] dt$$

gdzie: L_{PS} – wartość indukcyjności filtra na wejściu źródła prądu.

Jak wynika z (3), biorąc pod uwagę, że zarówno wartość napięcia sieci, jak i napięcia w obwodzie DC zasilacza są z góry narzucone, jedynym elementem mogącym zwiększyć dynamikę zmian prądu źródła jest zmniejszenie indukcyjności filtra.

Zasada działania przestrajalnego filtra indukcyjnego

Do realizacji przestrajalnego filtra indukcyjnego wykorzystano zjawisko sprzężenia magnetycznego dwóch cewek, których wartość indukcyjności wzajemnej wynosi M (rysunek 4). W podstawowej wersji układu wartość reaktancji zastępczej (X_{PS}) filtra, widzianej od strony źródła zasilania u_1 , osiąga dwie wartości – zależne od stanu łącznika S.



Rys.4. Zasada działania filtra indukcyjnego o przestrajalnej wartości indukcyjności

Wyznaczenie wartości indukcyjności zastępczej filtra opiera się na przedstawionej dalej analizie, wykorzystującej właściwości obwodów magnetycznie sprzężonych. Przyjęte założenia wstępne polegają na nieuwzględnianiu nieliniowości (jednorodnego) rdzenia ferromagnetycznego, na którym nawinięte są obie cewki.

Podstawowe wzory (przy wymuszeniach sinusoidalnie zmiennych oraz przy założeniu zerowych rezystancji obu cewek), opisujące relacje napięć i prądów w pokazanym na rysunku 4 obwodzie, są następujące

$$(4) \quad U_1 = jX_1 I_1 + jX_M I_2$$

$$(5) \quad U_2 = jX_2 I_2 + jX_M I_1$$

W wyniku wzajemnych przekształceń obu wzorów otrzymano następującą formułę, opisującą reaktancję zastępczą filtra w stanie zamknięcia klucza S

$$(6) \quad jX_{PS} = \frac{U_1}{I_1} = j \left(X_1 - \frac{X_M^2}{X_2} \right)$$

Biorąc pod uwagę, że przy przyjętych założeniach reaktancję wzajemną obu cewek (dla współczynnika sprzężenia magnetycznego k) określa się następująco

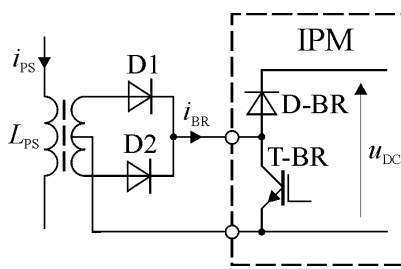
$$(7) \quad X_M = k \sqrt{X_1 X_2} : 0 \leq k \leq 1$$

oraz zakładając dodatkowo $X_1 = X_2 = X$, otrzymano końcową formułę, uzależniającą wartość reaktancji zastępczej filtra od współczynnika sprzężenia k

$$(8) \quad X_{PS} = (1 - a_S k^2) X : a_S = 0 \vee a_S = 1$$

gdzie: $a_S = 0$ – stan otwarcia klucza, $a_S = 1$ – stan zamknięcia klucza.

Przykładową realizację filtra przestrajalnego pokazano na rysunku 5.

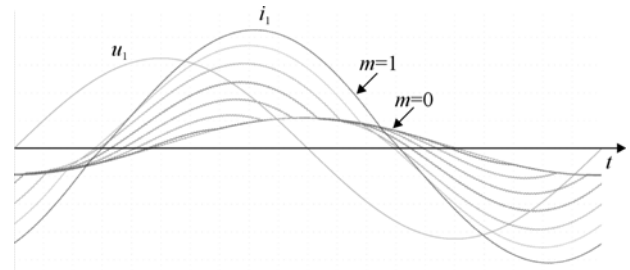


Rys.5. Schemat ideowy możliwej realizacji przestrajalnego filtra indukcyjnego

Główną rolę pełni tam transformator, o współczynniku sprzężenia strumieni magnetycznych równym k , z dzielonym uzwojeniem wtórnym, do którego dołączono szybki prostownik diodowy złożony z diod D1 i D2. Wyjście prostownika dołączone jest z kolei do kolektora tranzystora IGBT (T-BR), pełniącego rolę klucza S, oraz szyny „minus” obwodu DC zasilacza. Pokazana konfiguracja filtra ma tę zaletę, że energia gromadzona w polu magnetycznym transformatora (po zamknięciu klucza) zostaje przekierowana do obwodu DC zasilacza (po otwarciu klucza), co ogranicza straty mocy w układzie.

Należy zaznaczyć, że w przedstawionej powyżej wersji filtra możliwe jest uzyskanie płynnej zmiany jego tzw. indukcyjności zastępczej – poprzez zmianę współczynnika wypełnienia sygnału sterującego kluczem S (np. w trybie MSI). Jednak, na skutek skokowej zmiany impedancji

widzianej przez obwód wtórny układu staje się on nieliniowy, co zilustrowano na rysunku 6. Biorąc jednak pod uwagę zasadę sterowania tranzystorem T-BR w zasilaczu sieciowym, nieliniowość ta nie ma istotnego (negatywnego) wpływu na efekty jego działania.



Rys.6. Przebiegi napięcia i prądu w obwodzie pierwotnym filtra przy sterowaniu kluczem S przebiegiem MSI przy współczynniku głębokości modulacji w zakresie 0,1+1,0 z krokiem 0,1

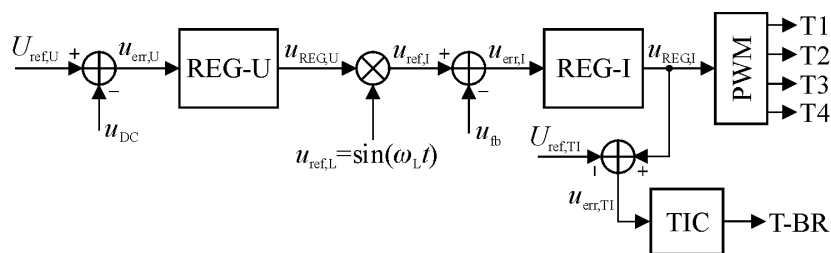
Ponieważ zarówno tranzystor T-BR, jak i dioda D-BR są elementami tzw. gałęzi hamującej, występującej w większości standardowych modułów IPM/IGBT, proponowane rozwiązanie ma również wyraźny walor ekonomiczny.

Układ sterowania

Ogólny schemat blokowy układu sterowania źródłem prądu z przestrajalną indukcyjnością przedstawiono na rysunku 7. W obecnej wersji składa się on z dwóch regulatorów i układu sterowania wartością indukcyjności filtra:

- REG-U – nadrzędnego regulatora napięcia w obwodzie DC zasilacza, z sygnałem odniesienia $U_{ref,U}$, który steruje wartością amplitudy sinusoidalnie zmiennego sygnału referencyjnego dla regulatora podrzędnego prądu sieci ($u_{ref,I}$),
- REG-I – podrzędnego regulatora prądu sieci, bazującego na (sinusoidalnie zmiennym) sygnale referencyjnym $u_{ref,I}$, zsynchronizowanym fazowo z napięciem sieci, i sygnale sprzężenia zwrotnego $u_{fb} = r_{CT} i_L$, gdzie r_{CT} jest stałą przenoszenia przetwornika pomiarowego prądu (CT),
- TIC – układu sterowania indukcyjnością filtra wejściowego.

Głównym elementem bloku TIC jest komparator z tzw. dynamiczną pętlą histerezy (DHC) [13]. Operuje on na sygnale $u_{err,TI} = u_{REG,I} - U_{ref,TI}$, gdzie $U_{ref,TI}$ jest sygnałem odniesienia dla bloku TIC. Jeżeli zachodzi $u_{err,TI} > 0$ następuje przejście komparatora w stan wysoki i załączenie klucza S.

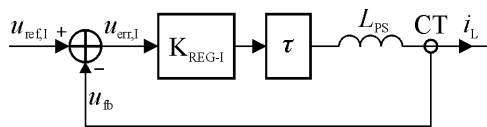


Rys.7. Schemat blokowy układu sterowania zasilaczem

Komparator typu DHC zapewnia pewien minimalny czas trwania impulsu na swoim wyjściu. A co za tym idzie, ograniczenie do z góry zadanej wartości maksymalnej częstotliwości serii takich impulsów. Częstotliwość ta związana jest (głównie) z wartością jego stałej czasowej. Cecha ta jest ważna dla właściwego sterowania kluczem S – pod kątem nieprzekraczania jego granicznych parametrów dynamicznych, a zatem np. ograniczania strat mocy, jak również, odporności układu na zaburzenia elektromagnetyczne.

Model liniowy energoelektronicznego źródła prądu

Model liniowy źródła prądu opracowany został w celu analizy jego stabilności asymptotycznej, jako zamkniętego układu regulacji automatycznej [11,12]. Schemat blokowy modelu pokazano na rysunku poniżej. Składają się na niego cztery główne bloki: transmitancji regulatora prądu, opóźnienia, filtra indukcyjnego i przetwornika pomiarowego prądu.



Rys.8. Schemat blokowy modelu liniowego źródła prądu

Transmitancja modelu – systemu elektrycznego typu SISO i LTV – dana jest następującym wzorem

$$(9) \quad G_{CS}(j\omega) = \frac{I_L(j\omega)}{U_{ref,I}(j\omega)} = \frac{K(j\omega)}{1 + r_{CT}K(j\omega)}$$

gdzie:

$$(10) \quad K(j\omega) = \frac{1}{j\omega L_{PS}} K_{REG-I}(j\omega) e^{-j\omega\tau}$$

przy czym: $K_{REG-I}(j\omega)$ – transmitancja regulatora prądu, τ – opóźnienie (dominująco, okres sygnału nośnego MSI), $L_{PS} = f(u_{REG,I}, t) = \text{var}$.

System typu LTV na ogół znacznie zwiększa złożoność algorytmu sterowania [12], gdyż wymaga on uwzględnienia zmiany parametru(-ów) określonego obiektu w czasie. Ze względu na możliwą, znaczną dynamikę zmian wartości prądu pobieranego przez inne odbiorniki nieliniowe (NL), powyższy system jest obiektem trudnym w sterowaniu metodami konwencjonalnymi (np. przy użyciu klasycznych regulatorów). Zakładając jednak pewną, ustaloną, wartość indukcyjności filtra oraz, że regulator prądu jest typu P (o wzmacnieniu dla DC wynoszącym $k_{REG-I,0}$), dla zapewnienia stabilności systemu wartość wzmacnienia spełniać musi następującą nierówność [15]

$$(11) \quad k_{REG-I,0} < 2 \frac{L_{PS}}{\tau}$$

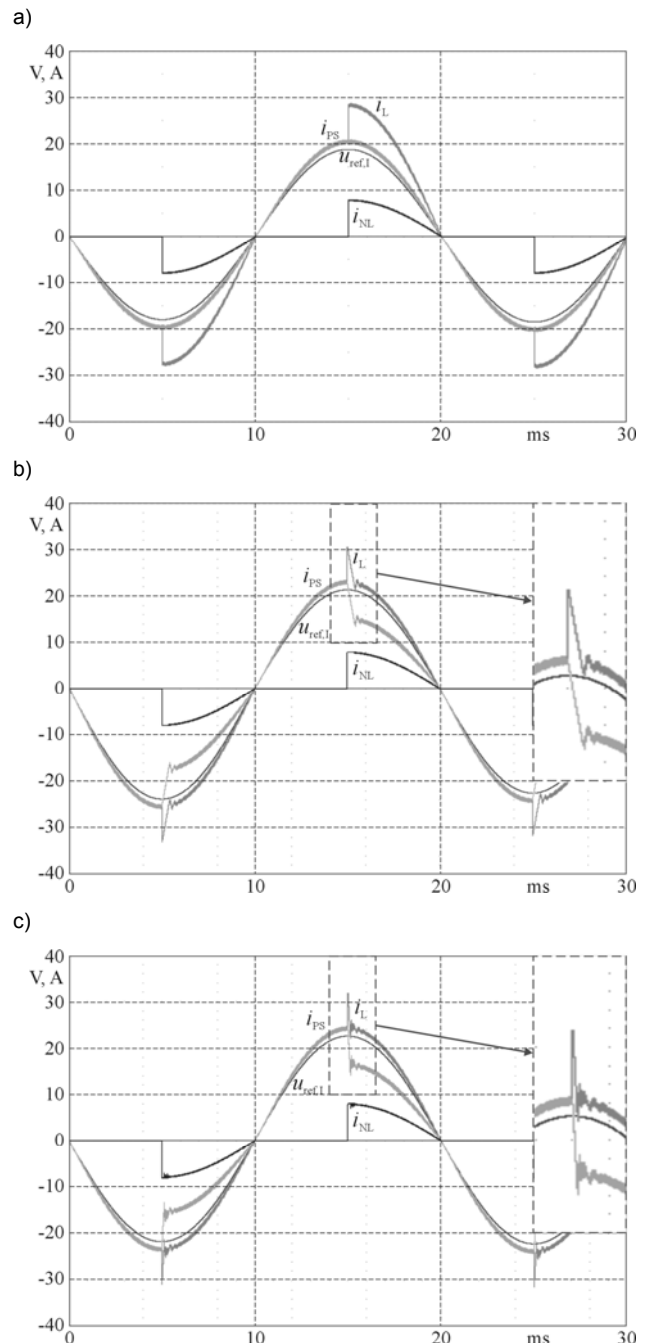
Badania modelu symulacyjnego systemu

Model symulacyjny systemu zbudowano w środowisku OrCAD/PSPICE, a jego podstawowe parametry elektryczne były następujące:

- moc znamionowa zasilacza: 3,5 kVA,
- parametry napięcia sieci: 230 V / 50 Hz,
- wartość znamionowa prądu wejściowego zasilacza: 15 A,
- wartość szczytowa prądu zasilacza: 30 A,
- znamionowe napięcie wyjściowe: 450 V,

- indukcyjność filtra przestrajalnego: 5 mH / 1,4 mH ($k = 0,85$),
- częstotliwość nośna MSI: 10 kHz.

Na rysunku 9 przedstawiono wybrane wyniki badań modelu symulacyjnego systemu w postaci charakterystycznych przebiegów napięć i prądów – w warunkach pracy zasilacza zbliżonych do znamionowych. Dotyczą one odbiornika nieliniowego (NL) w postaci tyrystorowego regulatora napięcia obciążonego rezystorem, narzucającego skrajnie duże wymagania odnośnie żądanej dynamiki zmian prądu wejściowego zasilacza (i_{PS}).



Rys.9. Przebiegi napięcia sieci i prądów w modelu symulacyjnym systemu: z wyłączoną funkcją kompensacji mocy biernej i mocy odkształcenia przez zasilacz (a), z włączoną funkcją kompensacji i filtrem o stałej indukcyjności (b), z włączoną funkcją kompensacji i filtrem o zmiennej indukcyjności (c)

Podstawowe wielkości, charakteryzujące jakość prądu sieci (i_L), to współczynnik zniekształceń nieliniowych (THD) oraz czas trwania stanu przejściowego w układzie (τ_S) – po skokowej zmianie wartości prądu odbiornika nieliniowego.

W wyniku badań modelu symulacyjnego otrzymano następujące wartości tych wielkości (przy czym, wyznaczając wartość współczynnika THD , uwzględniono 20 pierwszych harmonicznych prądu):

- funkcja kompensacji wyłączona: $THD = 12,1\%$,
- funkcja kompensacji włączona – filtr o stałej indukcyjności: $THD = 3,80\%$, $\tau_S = 0,6$ ms,
- funkcja kompensacji włączona – filtr o zmiennej indukcyjności: $THD = 1,27\%$, $\tau_S = 0,2$ ms.

Uzyskane wyniki wskazują na wyraźną (ok. 3-krotną wg podanych wskaźników) poprawę jakości prądu w wyniku zastosowania filtra o przestrajanej wartości indukcyjności.

Podsumowanie

Przedmiotem pracy było potwierdzenie poprawności działania przekształtnika energoelektronicznego z przestrajalnym filtrem indukcyjnym na wejściu, pełniącego rolę zasilacza sieciowego z funkcją aktywnej kompensacji równoległej mocy bierniej i mocy odkształcenia. Moce te były generowane przez inne (zewnętrzne) odbiorniki nieliniowe dołączone do tego samego, co zasilacz, węzła sieci elektroenergetycznej.

Zastosowanie przestrajalnego filtra indukcyjnego pozwoliło na wyraźne zwiększenie dynamiki zmian prądu na wejściu zasilacza – w stosunku do układu o stałej wartości tej indukcyjności. Wyniki badań modeli symulacyjnych systemu wskazują na wyraźną (3-krotną wg określonych w pracy wskaźników) poprawę jakości kompensacji w sytuacji zastosowania filtra o zmiennej indukcyjności. Proponowane algorytmy sterowania układem mogą skuteczniej poprawić jakość napięcia sieci elektroenergetycznej – w stosunku do klasycznych rozwiązań z układami PFC. Jednocześnie, ze względu na relatywnie niewielki stopień zwiększenia złożoności sprzętowej zasilacza (w stosunku do wersji bez funkcji kompensacji), stanowi on atrakcyjną ekonomicznie alternatywę dla typowych aktywnych filtrów równoległych.

Autorzy: mgr inż. Łukasz Ciepłiński, dr hab. inż. Michał Gwóźdź, dr inż. Michał Krystkowiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Lukasz.Cieplinski@put.poznan.pl, Michal.Gwozdz@put.poznan.pl, Michal.Krystkowiak@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Piróg S., *Energoelektronika. Negatywne oddziaływanie układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*, Wydawnictwo AGH, Kraków (1998)
- [2] <http://ever.eu/uploads/article/111/b4bfd68267b58731d503b5d77d53f88a07fd8aea.pdf>. Dostęp: czerwiec 2019
- [3] Shyu KK., Yang M.J., Chen C. Y.M., Lin Y.F., Model Reference Adaptive Control Design for a Shunt Active-Power-Filter System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (2008), 97-106
- [4] Huber L., Jang Y., Jovanovic M. M., Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23 (2008), 1381-1390
- [5] Mahdavi M., Farzanehfard H., Bridgeless SEPIC PFC Rectifier With Reduced Components and Conduction Losses, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2010), 4153-4160
- [6] Fryze S., Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, (1931) nr.7/8
- [7] Dmowski A., *Energoelektroniczne układy zasilania prądem stałym*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (1998)
- [8] Rosseto L., Spiazzi G., Tenti P., Control techniques for power factor correction converters, *Proceedings of PEMC'94*, Warszawa (1994)
- [9] Ferenczi Ö., *Zasilanie układów elektronicznych. Zasilacze impulsowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (1989)
- [10] Nowak M., Barlik R., *Poradnik inżyniera energoelektronika*, WNT, Warszawa (1998)
- [11] Jędrzykiewicz Z., *Teoria sterowania układów jednowymiarowych*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Kraków (2004)
- [12] Kaczorek T. (red.), *Podstawy teorii sterowania*, Wyd. II, WNT, Warszawa (2005, 2006)
- [13] Gwóźdź M., Broadband power electronics controlled voltage source with output stage based on GaN transistors, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 95 (2018), nr.5, 70-73
- [14] Krystkowiak M., Zmodyfikowany model szerokopasmowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego z modulacją prądu wyjściowego, *Elektronika: Konstrukcje, Technologie, Zastosowania*, 57 (2016), nr.11, 65-70
- [15] Gwóźdź M., Stability of Discrete Time Systems on Base of Generalized Sampling Expansion, *Quarterly Elektryka*, Silesian University of Technology, Issue 1, (2011), 29-40.