

Zasilacz sieciowy z przestrajalnym filtrem indukcyjnym i funkcją aktywnej kompensacji równoległej

Streszczenie. W pracy zaproponowano metodę aktywnej kompensacji równoległej, realizowanej za pomocą zasilacza sieciowego prądu stałego. Nowym aspektem pracy zaproponowanego układu jest zastosowanie przestrajalnego filtra indukcyjnego, umieszczonego na wejściu sterowanego źródła prądu, będącego podstawowym blokiem funkcjonalnym zasilacza. Zastosowanie przestrajalnego filtra indukcyjnego zwiększyło pasmo przenoszenia źródła a jednocześnie, w quasi-ustalonym stanie pracy układu, wartość składowej modulacji impulsowej (PWM) prądu wejściowego źródła pozostała na minimalnym, zakładanym poziomie. W pracy omówiono budowę systemu elektrycznego z zasilaczem i zasady jego działania a także, przedstawiono wyniki badań modeli symulacyjnego i laboratoryjnego układu.

Abstract. This work proposes a method of active parallel compensation, which can be implemented using a DC power supply. The second novel aspect of this work is the use of a tunable inductive filter, which is included at the input of the controlled current source. The use of a tunable inductive filter increases the bandwidth of the current source, while at the same time, in the quasi-steady state of the power supply operation, the carrier component (PWM) of the output current of current source remains at a minimum assumed level. The work discusses the design of the electrical system with the proposed power supply and the operating principles of this system and presents the results of simulation and laboratory model tests. (AC power supply with tunable induction filter and active parallel compensation function)

Słowa kluczowe: aktywny energetyczny filtr równoległy, jakość energii elektrycznej, współczynnik mocy, zasilacz prądu stałego.

Keywords: shunt active power filter, electrical energy quality, power factor correction, DC power supply.

Wprowadzenie

A. Wpływ systemów przekształtnikowych na działanie sieci energetycznej

Głównymi przyczynami niekorzystnego wpływu układów przekształtnikowych na pracę sieci elektroenergetycznej jest ich: nieliniowość, niestacjonarność oraz generowanie nieustalonych stanów napięcia i prądu, które występują w dynamicznych stanach pracy zarówno tych układów, jak i linii elektroenergetycznej [1]. Konwencjonalne rozwiązania układów przekształtnikowych, oparte na układach diodowych i tyrystorowych, powodują niekorzystne efekty w pracy linii elektroenergetycznej takie, jak komutacyjne załamania napięcia oraz odkształcenie przebiegu prądu od kształtu sinusoidalnego [2]. Większość nowoczesnych urządzeń jest projektowana w taki sposób, aby ich współczynnik mocy był bliski jedności, tj. są one wyposażone w funkcję PFC (PFC – Power Factor Correction) [3]. Jednak kontrola ta dotyczy tylko ich własnego prądu, pobieranego z sieci. Natomiast urządzeniami powszechnie stosowanymi do minimalizacji niekorzystnego wpływu odbiorników nieliniowych na pracę sieci są pasywne filtry mocy [4] jednak, pozwalają one jedynie na ograniczoną redukcję wartości mocy biernej, w z góry narzuconym zakresie, określonym na etapie ich projektowania. W związku z tym, często konieczne jest stosowanie filtrów aktywnych [5] lub, ze względu na ich wysoki koszt [6], filtrów hybrydowych [7]. Dzięki tym urządzeniom uzyskać można minimalizację wartości mocy biernej, pobieranej z sieci, i zmniejszenie zniekształceń prądu.

Wychodząc naprzeciw ww. potrzebom technicznym i ekonomicznym, w pracy przedstawiono koncepcję oraz wyniki badań dwufunkcyjnego układu energoelektronicznego w postaci zasilacza sieciowego prądu stałego, wyposażonego w dodatkową funkcję aktywnego filtra równoległego.

B. Wskaźniki oceny wpływu obciążeń na sieć

Jakość energii uznaje się za akceptowalną, jeśli odchylenie między wartościami jej parametrów, a wartościami normatywnymi, mieści się w granicach

narzuconych przez odpowiednie normy elektroenergetyczne [8]. Należy jednak zauważyć, że w odniesieniu do przebiegów odkształconych, dalej nie ma pełnej zgody wśród badaczy, co do sposobu definiowania niektórych wskaźników jakości energii elektrycznej [9-11]. W pracy, do określenia tejże, wykorzystano następujące parametry:

- TWD – współczynnik całkowitych zniekształceń nieliniowych sygnału [12]:

$$(1) \quad TWD = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_{1,RMS}^2}}{I_{1,RMS}} = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2}{I_{1,RMS}^2} - 1}.$$

- $\cos\varphi_L$ – współczynnik mocy, zdefiniowany zgodnie z teorią mocy Budeanu [10]; w przypadku przebiegów monoharmonicznych:

$$(2) \quad \cos\varphi_L = \frac{P_L}{S_L}.$$

- τ_L – czas trwania określonego stanu nieustalonego w prądzie wejściowym zasilacza.

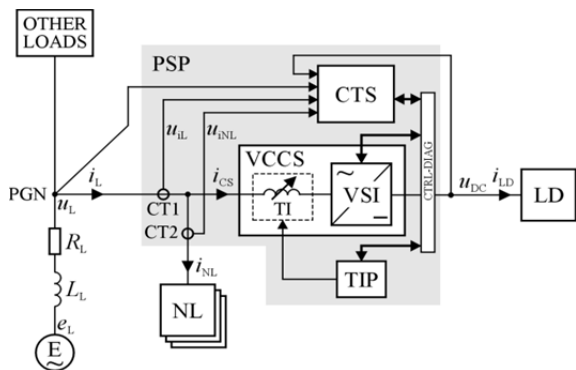
Uzasadnienie stosowania współczynnika TWD , zamiast THD , jest związane z permanentnym stanem dynamicznym pracy rzeczywistej sieci elektroenergetycznej [1].

Aktywna kompensacja równoległa odkształconego prądu systemu elektrycznego

A. Struktura zasilacza z przestrajalnym filtrem indukcyjnym

Schemat blokowy systemu elektrycznego z zasilaczem sieciowym (PSP), współpracującym z grupą odbiorników nieliniowych, przedstawiono na rys. 1.

Przestrajalny filtr indukcyjny (TI), znajdujący się na wejściu przekształtnika (VSI), charakteryzuje się zmienną wartością indukcyjności. Jej wartość jest kontrolowana przez dedykowany blok silnoprądowy (TIP), który znajduje się z kolei pod kontrolą bloku sterowania zasilaczem (CTS).



Rys. 1. Schemat blokowy systemu elektrycznego z zasilaczem, wyposażonym w funkcję aktywnej kompensacji równoległej i w przestrzalny filtr indukcyjny.

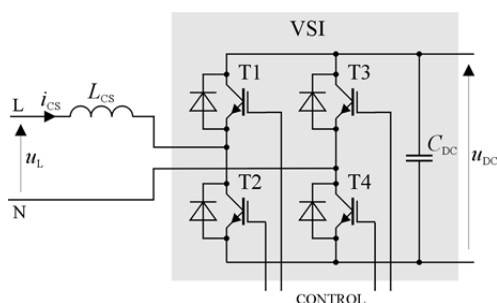
Do sterowania funkcją kompensacji zasilacza wybrano teorię mocy opracowaną przez Fryzego [9]. Ogólnym celem optymalizacji prądu systemu elektrycznego (i_L) jest minimalizacja jego wartości skutecznej. Sterowane źródło prądu (blok VCCS) wymusza przepływ takiego prądu na swoim wejściu, który, w połączeniu z prądem odbiornika nieliniowego, daje wynikowy prąd o (teoretycznie) kształcie sinusoidalnym:

$$(3) \quad i_L(t) = i_{NL}(t) + i_{CS}(t) = i_{ref,L}(t) = I_{ref,L} \sin(\omega_L t)$$

gdzie $I_{ref,L}$ jest amplitudą prądu odniesienia.

B. Wpływ części silnoprądowej na wartości parametrów dynamicznych zasilacza

Wejściowy stopień mocy zasilacza to mostek tranzystorowy typu H z filtrem indukcyjnym (L_{CS}) na wejściu, jak pokazano na rys. 2. Obwód ten tworzy sterowane energoelektroniczne źródło prądu (VCCS) [13]. Jego zadaniem jest zapewnienie wymaganego napięcia (u_{DC}) w obwodzie DC zasilacza oraz aktywna kompensacja przesunięcia fazowego i wyższych harmonicznych prądu odbiornika nieliniowego (bloku NL).



Rys. 2. Schemat przedstawiający wejściowy stopień mocy PSP.

Przebieg prądu wejściowego bloku VCCS (i_{CS}) opisany jest następującym wzorem, który nie uwzględnia jednak: rezystancji filtra, impedancji sieci oraz spadków napięcia na kluczach tranzystorowych:

$$(4) \quad i_{CS}(t) = \frac{1}{L_{CS}} \int [u_{DC}(t) - |u_L(t)|] dt$$

Zdolność źródła prądu do kształtowania prądu wejściowego zależy głównie od wartości jego szerokości pasma przenoszenia (BW) [13]:

$$(5) \quad BW = \frac{1}{2\pi I_{CS}} SR,$$

gdzie I_{CS} jest maksymalną amplitudą sterowanego źródła prądu, a SR jest graniczną wartością szybkości zmian prądu tego źródła (określoną w A/s).

Odnosząc się tylko do pierwszego półokresu napięcia sieci, parametr SR osiąga dwie skrajne wartości:

$$(6) \quad SR_{max} = \frac{1}{L_{CS}} u_{DC}(t_0) \Big|_{t_0=0},$$

$$(7) \quad SR_{min} = \frac{1}{L_{CS}} [u_{DC}(t_1) - U_L] \Big|_{t_1=\frac{\pi}{2\omega_L}},$$

gdzie U_L jest amplitudą napięcia w węzle sieci.

Jeśli założymy, że wartości napięcia sieciowego i napięcia w obwodzie DC są narzucone z góry, dynamikę zmian prądu VCCS można zwiększyć jedynie poprzez zmniejszenie wartości indukcyjności filtra. Spowodowałoby to jednak wzrost wartości składowej nośnej modulacji impulsowej (tutaj PWM) w prądzie źródła. Dlatego też, aby rozszerzyć pasmo przenoszenia sterowanego źródła prądu, zastosowano przestrzalny filtr indukcyjny.

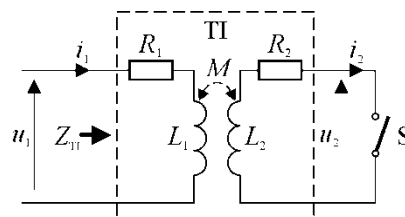
Zasada działania przestrzalnego filtra indukcyjnego

Do realizacji przestrzalnego filtra indukcyjnego, wykorzystano zjawisko sprzężenia strumieni magnetycznych dwóch cewek (rys. 3). Wypadkowy strumień magnetyczny może być wzmacniany lub osłabiany, co powoduje zmianę wypadkowej indukcyjności filtra.

Impedancja zastępcza (Z_{TI}) filtra osiągać może dwie wartości, zgodne z poniższym równaniem. Zależy ona od współczynnika sprzężenia magnetycznego (k) i stanu klucza S :

$$(8) \quad X_{TI} = (1 - s_{T-TI} k^2) X_1 \Big|_{s_{T-TI}=0 \vee s_{T-TI}=1},$$

gdzie $s_{T-TI} = 0$ oznacza stan klucza, jako otwartego, a $s_{T-TI} = 1$ oznacza stan klucza, jako zamkniętego.

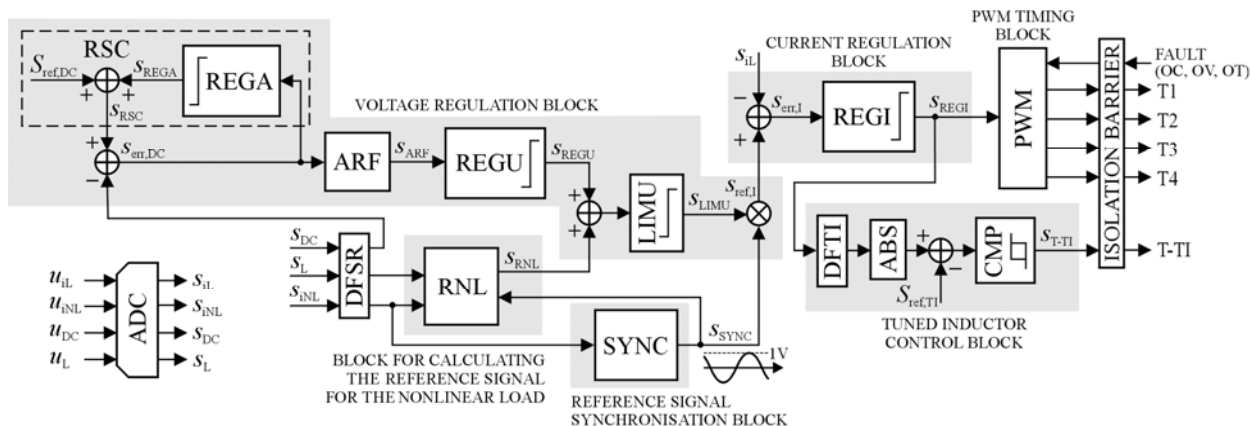


Rys. 3. Schemat przedstawiający zasadę działania proponowanego przestrzalnego filtra indukcyjnego.

Główną rolę w tym obwodzie odgrywa transformator o współczynniku sprzężenia strumienia magnetycznego $k = 0,85$. Wartość ta wybrana została na podstawie wcześniejszych badań modeli symulacyjnych systemu.

Do tej pory, zmiany indukcyjności były uzyskiwane poprzez rekonfigurację zespołu dławików lub poprzez bardziej zaawansowane metody, polegające na podmagnesowaniu rdzenia składową stałą [14-16], które mają jednak (na ogół) niższą sprawność energetyczną, niż proponowane w tej pracy rozwiązanie, i są bardziej złożone technicznie.

Ponieważ niniejsze opracowanie jest kontynuacją wcześniejszych prac autorów, więcej informacji szczegółowych na temat proponowanego rozwiązania



Rys. 4. Schemat blokowy przedstawiający system sterowania zasilaczem.

przestrajalnego filtra indukcyjnego znaleźć można m.in. w publikacjach [17-19].

Blok sterowania zasilaczem

Schemat bloku sterowania zasilaczem (CTS) pokazano na rys. 4. Funkcja każdego z podbloków została szczegółowo opisana w pracy [19] a tutaj, dla wygody czytelnika, podano krótkie tylko podsumowanie struktury układu sterowania; składa się ona z następujących podbloków:

- regulacji napięcia, który odpowiada za zapewnienie prawidłowej wartości napięcia w obwodzie DC zasilacza;
- wyznaczania wartości sygnału referencyjnego dla obciążenia nieliniowego (RNL); działanie tego bloku opiera się na teorii mocy Fryzego [9];
- synchronizacji sygnału referencyjnego (SYNC) z przebiegiem napięcia sieci, który generuje sygnał sinusoidalny o jednostkowej wartości amplitudy, i jest zsynchronizowany fazowo z przebiegiem napięcia w węzle linii elektroenergetycznej;
- regulacji prądu, który odpowiada za generowanie przez VCCS prądu wejściowego jego odpowiednim kształcie;
- sterowania przestrajalnym filtrem indukcyjnym – poprzez blok TIP.

Model symulacyjny zasilacza

Tabela 1. Parametry systemu elektrycznego z zasilaczem

| No. | Parametr | Symbol | Wartość |
|--|--|-------------|--------------|
| Wartości znamionowe sieci energetycznej i zasilacza | | | |
| 1 | Wartość skuteczna napięcia sieci | $U_{L,RMS}$ | 230 V |
| 2 | Częstotliwość napięcia sieci | f_L | 50 Hz |
| 3 | Rezystancja linii sieci | R_L | 0,5 Ω |
| 4 | Indukcyjność linii sieci | L_L | 0,4 mH |
| 5 | Znamionowa moc wyjściowa PSP | $P_{DC,n}$ | 1,2 kW |
| 6 | Napięcie znamionowe w obwodzie DC i zakres jego nastaw | $U_{DC,n}$ | 375±25 V |
| Parametry VCCS | | | |
| 7 | Indukcyjność filtra, klucz S otwarty | L_{TI} | 4,52 mH |
| 8 | Indukcyjność filtra, klucz S zamknięty | L_{TI} | 1,51 mH |
| 9 | Pojemność kondensatora w obwodzie prądu stałego | C_{DC} | 1 mF |
| 10 | Częstotliwość nośna PWM | f_c | 10 Hz |

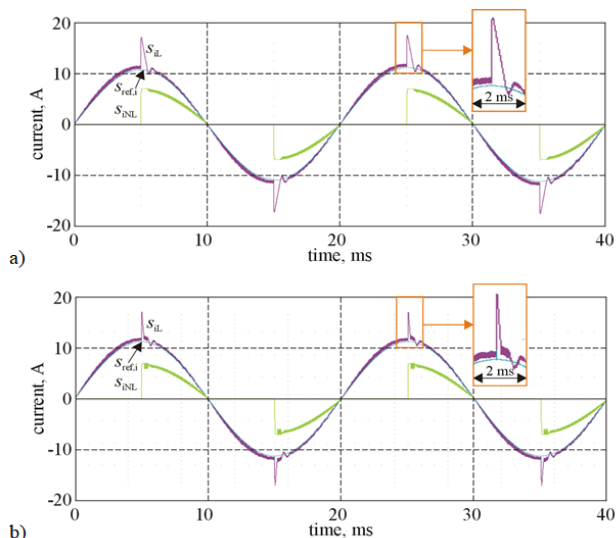
A. Struktura i parametry modelu symulacyjnego

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku ORCAD/PSpice. Złożone strukturalnie bloki RNL i SYNC zamodelowano w uproszczonej formie, wykorzystując źródła sygnału o z góry ustalonych wartościach parametrów. Wartości głównych parametrów modelu symulacyjnego były zgodne z docelowym modelem laboratoryjnym; przedstawiono je w tabeli 1.

B. Badania modelu symulacyjnego

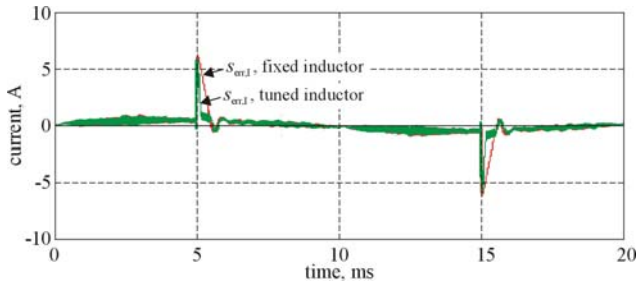
W modelu symulacyjnym, jako obciążenie nieliniowe zastosowano tyrystorowy regulator napięcia, obciążony rezystorem (obciążenie typu T-R). Moc bloku NL została ustawiona na 50 % nominalnej mocy wyjściowej PSP (po stronie DC). Kąt załączenia tyrystorów ustawiono na 90 st. el.

Na rys. 5 przedstawiono przykładowe wyniki badań modelu – w postaci prądu wejściowego zasilacza i prądu bloku NL dla filtra indukcyjnego o stałej (rys. 5a) i zmiennej wartości indukcyjności (rys. 5b) oraz z włączoną funkcją kompensacji zasilacza. Pokazane tutaj przebiegi przedstawiają pracę modelu w warunkach znamionowych. Czas trwania stanu nieustalonego, w postaci szczytu prądowego, został skrócony do około 40 % czasu jego trwania dla wariantu układu z filtrem o stałej indukcyjności.



Rys. 5. Przebiegi sygnału referencyjnego, prądu systemu elektrycznego i prądu bloku NL, przy włączonej funkcji kompensacji i zastosowaniu (a) stałego i (b) przestrajalnego filtra indukcyjnego.

Wykonano także badania porównawcze wartości błędu sterowania regulatora prądu (REGI) dla obu typów filtrów indukcyjnych. Przebieg sygnału błędu, w znamionowych warunkach pracy modelu symulacyjnego systemu, pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Przebiegi sygnału błędu w bloku regulacji prądu dla filtra indukcyjnego o stałej (czerwony) i zmiennej (zielony) wartości indukcyjności.

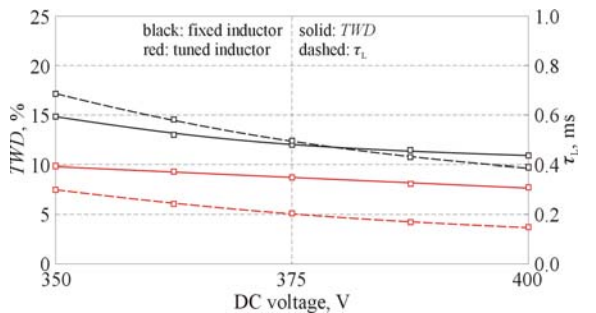
Przebiegi te są niemal tożsame, za wyjątkiem stanu przejściowego na wyjściu regulatora prądu, który związany jest z nasycaniem się jego wyjścia. W celu ilościowej oceny jakości pracy regulatora prądu wykorzystano wzór, określający wartość błędu regulacji [20] (ε_{REGI}), jako relację wartości skutecznego sygnału błędu ($S_{err,I,RMS}$) i sygnału referencyjnego (odniesienia) dla regulatora prądu ($S_{ref,I}$):

$$(9) \quad \varepsilon_{REGI} = \sqrt{2} \frac{S_{err,I,RMS}}{S_{ref,I}} 100\% ,$$

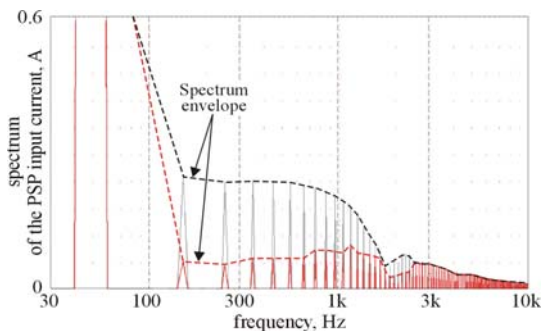
gdzie $S_{ref,I}$ jest amplitudą sygnału referencyjnego.

Wartość parametru ε_{REGI} wyniosła 12,2 % dla modelu z filtrem o stałej indukcyjności i 9,0 % dla modelu z filtrem o zmiennej indukcyjności.

Na rys. 7 przedstawiono zależności współczynnika TWD i stanu nieustalonego τ_L prądu wejściowego zasilacza od napięcia w obwodzie DC, dla mocy wyjściowej zasilacza równej wartości nominalnej. Wyniki wskazują na około 1,5-krotne zmniejszenie wartości parametru TWD i około 2,4-krotne zmniejszenie czasu trwania stanu nieustalonego w przypadku zasilacza z przestrajalnym filtrem indukcyjnym, w porównaniu do rozwiązania tradycyjnego.



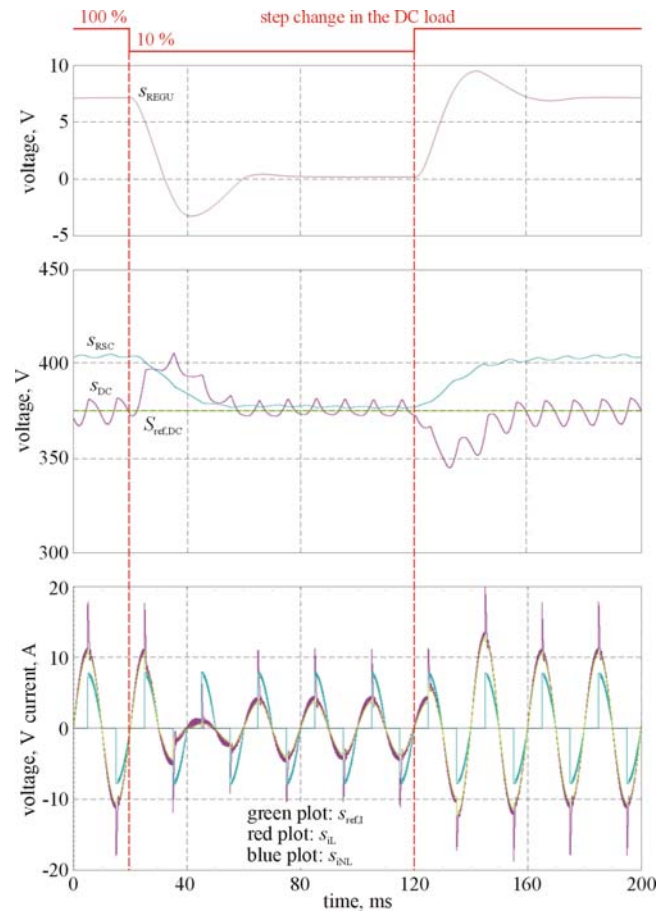
Rys. 7. Wykresy TWD i τ_L prądu modelu symulacyjnego systemu elektrycznego w funkcji napięcia w obwodzie DC.



Rys. 8. Widmo prądu systemu elektrycznego (kolor czarny – stała indukcyjność filtra, kolor czerwony – zmienna indukcyjność filtra).

Na rys. 8 przedstawiono widmo prądu sieciowego PSP. Amplituda jego podstawowej harmonicznej wynosiła 11,1 A.

Ostatni, prezentowany tutaj, test modelu symulacyjnego systemu miał na celu ocenę błędów statycznych i dynamicznych regulacji napięcia w obwodzie DC, w odpowiedzi na skokową zmianę wartości obciążenia w tym obwodzie. W górnej części rys. 9 widać, że sygnał wyjściowy regulatora napięcia (s_{REGU}) przyjmuje stałą wartość w ustalonym stanie pracy. Świadczy to o poprawności koncepcji działania filtra przeciwświetniowego (ARF), pod kątem eliminacji z sygnału wejściowego regulatora napięcia (REGU) składowej zmiennej (100 Hz), związanej z przebiegiem napięcia w obwodzie prądu stałego zasilacza.



Rys. 9. Charakterystyczne przebiegi w modelu symulacyjnym przedstawiające reakcję zasilacza na skokową zmianę wartości obciążenia w obwodzie DC.

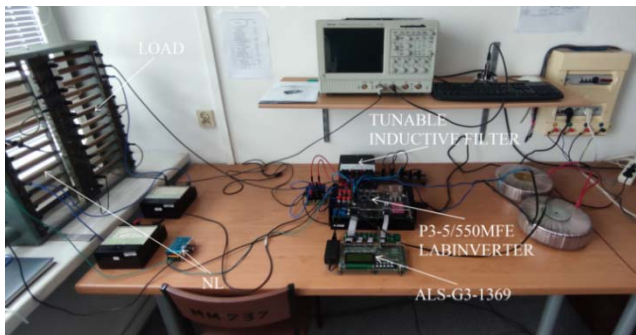
W ustalonym stanie pracy systemu, dzięki pracy bloku RSC, średnia wartość napięcia stałego na obwodzie pośrednim była zbliżona do wartości napięcia odniesienia dla regulatora napięcia. Średnia wartość błędu regulacji wynosiła około 1 V, czyli około 0,27 % wartości sygnału zadanego. Wartość tego błędu była niezależna zarówno od zadanej wartości napięcia na obwodzie DC, jak i od wartości obciążenia. Czas trwania stanu przejściowego napięcia w obwodzie DC, po skokowej zmianie jego obciążenia, liczony do momentu osiągnięcia 90 % wartości zadanej tego napięcia, był równy około dwóm okresom napięcia sieci.

Model laboratoryjny zasilacza

A. Stanowisko laboratoryjne

W części silnoprądowej modelu PSP zastosowano przekształtnik laboratoryjny typu P3-5-550MFE LABINVERTER [21]. W bloku sterowania PSP zastosowano układ uruchomieniowy typu ALS-G3-1369 [21] z cyfrowym procesorem sygnałowym. Widok stanowiska laboratoryjnego pokazano na rys. 10.

Algorytm sterowania zasilaczem zgodny był z jego schematem blokowym, przedstawionym na rys. 4. W modelu zaimplementowano pełne wersje wszystkich podbloków układu sterowania, wykorzystując algorytmy opisane m.in. w pracy [19].



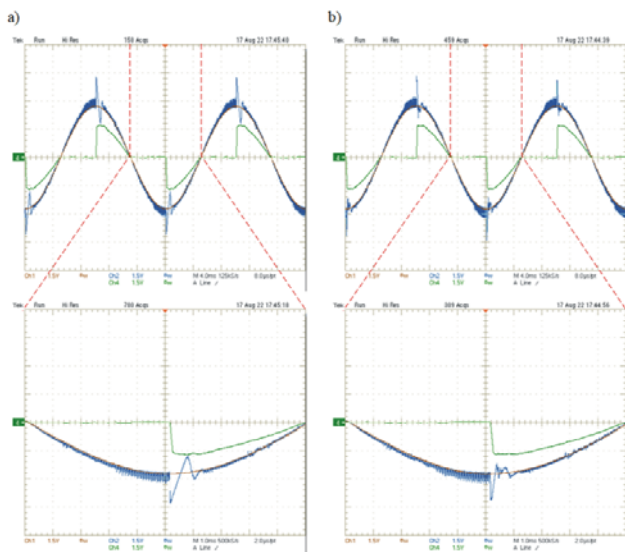
Rys. 10. Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego.

Rejestracja, wizualizacja i analiza parametrów sygnałów została przeprowadzona przy użyciu czterokanałowego oscyloskopu cyfrowego typu TDS3054B (TEKTRONIX) oraz funkcji PLOT środowiska VisualDSP++. Szerokość pasma pomiarowego oscyloskopu wynosiła 31,125 kHz.

B. Testy zasilacza dla obciążenia typu T-R

Badania modelu podzielono na dwie części. Pierwsza z nich dotyczyła oceny wartości parametrów TWD , τ_L oraz ϵ_{REG} , natomiast druga grupa dotyczyła jakości regulacji napięcia w obwodzie DC – w zakresie wartości błędu statycznego oraz czasu odpowiedzi układu na skokową zmianę wartości obciążenia.

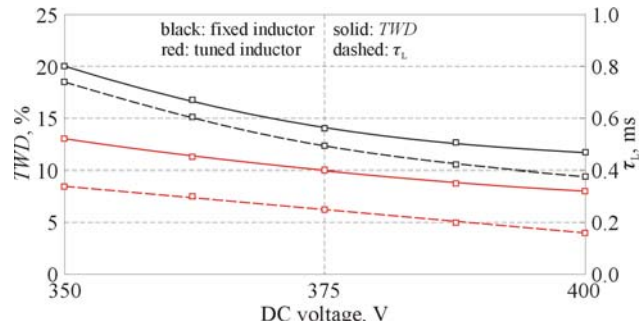
Rys. 11 przedstawia przykładowe przebiegi prądu odbiornika nieliniowego, sygnału referencyjnego dla regulatora prądu i prądu wejściowego PSP.



Rys. 11. Przebiegi dla znamionowych parametrów zasilacza: a) $L_{T1} = \text{const}$; b) $L_{T1} = \text{var}$ (czerwony: sygnał odniesienia dla regulatora prądu; niebieski: prąd wejściowy PSP; zielony: prąd bloku NL; skala osi pionowej: 6 A/div).

Na podstawie zarejestrowanych danych wyznaczono wartości błędu sterowania (ϵ_{REG}). Dla nominalnej wartości mocy wyjściowej wynosiły one, odpowiednio, 14,0 % i 9,3 % dla stałej i zmiennej wartości filtra indukcyjnego.

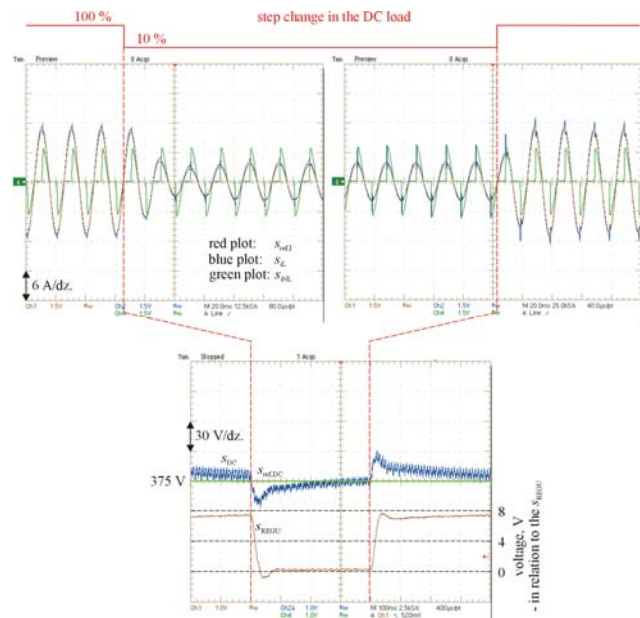
Na rys. 12 pokazano krzywe zmian współczynnika TWD prądu wejściowego PSP i stanu przejściowego τ_L tego prądu. Zostały one wykreślone w funkcji wartości napięcia w obwodzie DC. Rysunek ten jest odpowiednikiem rys. 7, dotyczącego badań modelu symulacyjnego.



Rys. 12. Wykresy TWD i τ_L prądu modelu laboratoryjnego systemu elektrycznego w funkcji napięcia obwodu DC.

Druga część badań modelu laboratoryjnego skupiała się na ocenie błędu statycznego regulacji napięcia w obwodzie prądu stałego oraz czasu jego reakcji na skokową zmianę wartości obciążenia w znacznym zakresie, tj. 10-krotności zmiany obciążenia. W tej części badań rejestrowano następujące przebiegi: prądów, sygnału odniesienia dla regulatora prądu, napięcia w obwodzie DC oraz sygnału wyjściowego regulatora napięcia.

Przykładowe przebiegi prądów i napięć w badanym układzie przedstawiono na rys. 13 (dla wartości napięcia znamionowego w obwodzie DC, tj. 375 V). Rysunek ten jest odpowiednikiem rys. 9, dotyczącego badań modelu symulacyjnego.



Rys. 13. Charakterystyczne przebiegi sygnałów w modelu laboratoryjnym PSP, przedstawiające reakcję układu na skokową zmianę wartości obciążenia w obwodzie DC.

Na podstawie analizy zarejestrowanych przebiegów oszacowano wartość statycznego błędu regulacji, który mieścił się w przedziale około $\pm 1,5$ V, względem wartości napięcia zadanego. W odniesieniu do napięcia znamionowego w obwodzie DC oznacza to, że względna

dokładność regulacji mieściła się w przedziale od 99,6 % do 100,4 % wartości zadanej. Czas reakcji układu na skokową zmianę wartości obciążenia toru prądu stałego wynosił ok. 50 ms, przy założeniu, że sygnał wyjściowy regulatora napięcia osiągnął 90 % wartości zadanej, co odpowiadało ok. 2,5 okresom napięcia sieci.

Podsumowanie

Dzięki zastosowaniu przestrajalnego filtra indukcyjnego, w obu modelach systemu uzyskano wyraźną redukcję zniekształceń nieliniowych prądu wejściowego zasilacza i zmniejszenie wartości czasu trwania stanu przejściowego w tym prądzie. Co więcej, uzyskane wyniki badań modeli symulacyjnego i laboratoryjnego zasilacza były, w dużej mierze, ze sobą zbieżne. Potwierdziły to przebiegi oraz analizy wartości parametrów TWD i τ_L dla prądu PSP, w zmiennych warunkach pracy całego systemu. Różnice w wynikach badań obu modeli (na niekorzyść modelu praktycznego) wynikały głównie z trudności w uwzględnieniu w modelu symulacyjnym wszystkich parametrów eksploatacyjnych modelu rzeczywistego. W szczególności dotyczyło to modelu linii elektroenergetycznej, w której, w warunkach rzeczywistych, występują permanentne stany nieustalone.

Autorzy: dr inż. Łukasz Ciepliński, E-mail: lukasz.cieplinski@put.poznan.pl; dr hab. inż. Michał Gwóźdź, prof. PP; E-mail: michal.gwozdz@put.poznan.pl; mgr. inż. Adam Gulczyński, E-mail: adam.gulczynski@put.poznan.pl; Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

LITERATURA

- [1] Rashid M. H., *Power Electronics Handbook*. Oxford: Elsevier Ltd., 2018. ISBN: 0-12-581650-2.
- [2] Akagi H., Watanabe E. H., and Aredes M., *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017. ISBN: 9781118362105.
- [3] Ding M., Li H., Zhao L., and Yang D., *A High-Performance Isolated Bridgeless Resonant SEPIC PFC Converter at Medium Line Frequencies*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 38, No. 8, pp. 10040-10051, Aug. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3279610.
- [4] Fang J., Li X., and Tang Y., *A review of passive power filters for voltage-source converters*, 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ACEPT.2016.7811547.
- [5] Vahedi H., Shojaei A. A., Dessaint L., and Al-Haddad K., *Reduced DC-link voltage active power filter using modified PUC5 converter*, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 33, pp. 943–947, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2727325>.
- [6] Maciążek M., Grabowski D., Pasko M., and Lewandowski M., *Compensation based on active power filters – The cost minimization*, Applied Mathematics and Computation, Vol. 267, pp. 648–654, 2015. ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.01.001>.
- [7] Pasko M. and Buła D., *Hybrydowe energetyczne filtry aktywne*, *Przeegląd Elektrotechniczny*, Vol. 83, No. 7/8, pp. 1–5 (2007).
- [8] PN-EN 50160:2010 norm – Parameters of supply voltage in public power grids.
- [9] Fryze S., *Active, reactive, and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current*, *Przeegląd Elektrotechniczny*, Vol. 13, pp. 193–203, 1931.
- [10] Budeanu C. I., *Puissances Réactives et Fictives*, Inst. Romain de l'Energie, Bucharest, Romania, 1927.
- [11] Zajkowski K., *Wady teorii mocy w obwodach jednofazowych według Budeanu i Fryzego*, *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 2016, Tom R. 17, Nr 12, ss. 1500–1504.
- [12] Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., and Duque-Perez O., *A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems*, *Energies*, Vol. 14, 6467, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14206467>.
- [13] Gwóźdź M., *Power electronics active shunt filter with controlled dynamics*, *Proc. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 1337–1344, 2013.
- [14] Wei Y., Luo Q., Du X., Altin N., Alonso J. M., and Mantooth H. A., *Analysis and Design of the LLC Resonant Converter With Variable Inductor Control Based on Time-Domain Analysis*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, No. 7, pp. 5432–5443, July 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2934085.
- [15] Li Y. et al., *Extension of ZVS Region of Series-Series WPT Systems by an Auxiliary Variable Inductor for Improving Efficiency*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 36, No. 7, pp. 7513–7525, July 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3042011.
- [16] Zhang Z. et al., *All-Fixed Switching Frequency Control of CRM Boost PFC Converter Based on Variable Inductor in a Wide Input Voltage Range*, 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 1434–1441, doi: 10.1109/ECCE.2019.8913202.
- [17] Gwóźdź M., Wojciechowski R. M., and Ciepliński Ł., *Power supply with parallel reactive and distortion power compensation and tunable inductive filter — Part 2*, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, Vol. 69(4), 2021, Article number: e137938 DOI: 10.24425/bpasts.2021.137938.
- [18] Gwóźdź M., *The application of tuned inductors in electric power systems*, *Energies*, Vol. 15, No. 22, 8481, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15228481>.
- [19] Ciepliński Ł., Gwóźdź M., and Wojciechowski R. M., *Application of a tuned inductor in a DC power supply with an active compensation function*, *Energies*, Vol. 15, 6108, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15176108>.
- [20] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., and Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania*, Warszawa: Publishing House WNT, 2020.
- [21] WWW Alfine-TIM, <http://analog.alfine.pl/oferta/produkty-alfine> [Access: 14.07.2023].