

Jednofazowy energetyczny filtr aktywny z zasobnikiem energii do kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej - badania symulacyjne

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję filtra aktywnego z zasobnikiem energii przystosowanego do kompensacji chwilowych dużych obciążeń mocą czynną i bierną o nieciągłym okresowym lub prawie okresowym charakterze jej poboru (np. zgrzewarek punktowych). Zadaniem układu, oprócz typowych możliwości filtracyjnych jest również realizacja ciągłości poboru energii z linii zasilającej - ograniczenie wahań mocy czynnej. Przebiegi prądu otrzymane w wyniku zgrzewania umożliwiły analizę zjawisk towarzyszących pracy tego typu odbiorników, jak również zwymiarowanie elementów w badanym układzie. Badania symulacyjne przeprowadzone w środowisku Matlab & Simulink potwierdziły wysoką skuteczność prezentowanego rozwiązania.

Abstract. This paper presents a novel active power filter equipped with an energy storage system. Solution can be used for compensation of single-phase, high active and reactive momentary power loads. Characterized by non-periodic power flow (e.g. spot-welders). Apart from typical filtration capabilities, the device is responsible for continuous energy flow from the mains and reduction of active power fluctuations. The current waveforms which occurred during welding enabled the analysis of the phenomena associated with operation of such loads, as well as dimensioning of passive elements in the structure. Simulation studies, carried out in Matlab & Simulink environment, confirmed high efficiency of presented solution. (Single-phase active filter with an energy storage system used for compensation of active-power fluctuations – simulation results).

Słowa kluczowe: filtr aktywny, przekształtnik DC/DC, wahania mocy czynnej, zgrzewarka punktowa.

Keywords: active power filter, DC/DC converter, active power fluctuations, spot welder.

Wstęp

Jednym z kluczowych problemów współczesnej energoelektroniki jest poprawa jakości energii elektrycznej. A zwłaszcza działania zmierzające do ograniczenia mocy aparatury dystrybucyjnej (transformatorów, przewodów, aparatura łączeniowej) [1], [2]. Sprowadza się to m.in. do nadążnej kompensacji mocy biernej i filtracji harmonicznych prądu, generowanych przez nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej. Realizują to kompensatory mocy biernej oraz energetyczne filtry aktywne [3], kompensujące składową nieaktywną prądu wg definicji S. Fryzego [3]-[5]. W przypadku odbiorników o pracy nieciągłej - gdzie czas pracy urządzenia w odniesieniu do czasu spoczynkowego jest relatywnie krótki, instalacja zasilająca (linia, aparatura rozdzielcza) są wymiarowane na obciążenia szczytowe. Dlatego aby zapewnić poprawne warunki pracy innych urządzeń zasilanych z tej samej linii, moc zwarciova w punkcie przyłączenia musi być odpowiednio duża. Zastosowanie dodatkowego magazynu energii pobierającego energię przy braku obciążenia przez odbiorniki i wspomagającego ich zasilanie podczas ich pracy, stwarza możliwość radykalnego zmniejszenia szczytowej wartości mocy, a tym samym wymagań stawianych m.in. instalacji zasilającej.

Dla zasilania tak pracujących, nieliniowych odbiorników jednofazowych zastosowanie energetycznego filtra aktywnego połączonego z zasobnikiem energii, umożliwi pobieranie energii przy mocy zbliżonej do jej średniej w przyjętym przedziale czasu, lecz przy minimalnych jej wahanach (poprzez ograniczenie wartości składowej zmiennej mocy średniej).

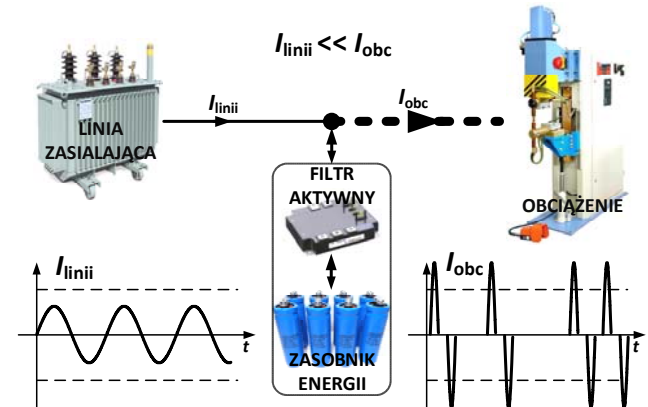
Ideę działania układu przedstawiono na rys. 1. Układu jest złożony z linii zasilającej, filtra, zasobnika energii oraz niespokojnego odbiornika. Na rysunku zaznaczono również prąd linii zasilającej (I_{linii}) oraz prąd odbiornika (I_{obc}).

Połączenia między elementami symbolizują możliwe drogi przepływu energii. Natomiast naniesione na nich strzałki, oznaczają możliwe kierunki jej przepływu oraz sposób jej pobierania (ciągły lub dorywczy).

Układ ma dążyć do utrzymania poboru energii przy ciągłym przepływie prądu I_{linii} o wartości skutecznej wynikającej z energii dostarczanej w analizowanym

przedziale czasu. A co za tym idzie wartości wielokrotnie mniejszej niż chwilowo wymuszanej przez okresowo załączane obciążenie (I_{obc}).

W układzie takim energia do obciążenia nie jest już dostarczana wyłącznie z linii, ale również przez zasobnik filtra aktywnego. Przez co, maksymalna moc od strony linii zasilającej ulega znaczonemu obniżeniu. W związku z tym, linia może być wymiarowana na mniejsze prądy.

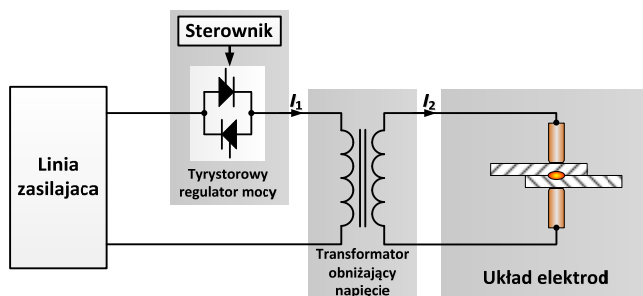


Rys.1. Schemat poglądowy układu kompensatora wahań mocy czynnej

Ciągłość poboru energii z linii zasilającej, realizowana przez filtr oznacza konieczność magazynowania przez układ energii w trakcie przerw w pracy obciążenia oraz jej oddawanie trakcie jego pracy.

Przy założeniu, iż czas pracy obciążenia jest wielokrotnie mniejszy od jego czasu spoczynkowego, odpowiednio dobrana wartość prądu, o charakterze ciągłym i prawie stałym w czasie, jest w stanie kompensować okresowo występujące obciążenie, o wielokrotnie większej wartości.

Jako kompensowany i filtrowany obiekt, dla którego dodatkowo będzie realizowane ograniczenie wahań mocy czynnej przyjęto jednofazową zgrzewarkę z tyrystorowym regulatorem prądu, której schemat blokowy przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat analizowanego układu zgrzewarki

Zgrzewarki są odbiornikami jednofazowymi, zasilanymi napięciem międzyfazowym wyposażonymi w regulatory tyrystorowe [6]. Umożliwia to regulację mocy dostarczanej do punktu zgrzewu (tzw. jądra zgrzeiny).

Występujący w układzie transformator, zapewnia izolację od sieci i odpowiednie zwiększenie wartości prądu zgrzewania, umożliwiając zastosowanie łączników tyrystorowych o wielokrotnie mniejszym zakresie prądowym, montowanych po stronie pierwotnej transformatora.

W trakcie pracy urządzenia tego typu wymuszają przepływ przez linie prądów odukształconych o dużej wartości składowej bierniej, odpowiadającej za spadki napięcia na reaktancji linii zasilającej, a przede wszystkim na reaktancji transformatora sieciowego. Spadki te niekorzystnie oddziałują na pracę wszystkich odbiorników dołączonych do tego samego węzła zasilającego. Problem ten dotyczy również innych, odbiorników o cyklicznym charakterze pracy np. napędu dźwigów i wind [7]-[9].

Obecnie do niesymetrycznych i nieliniowych odbiorników pracujących cyklicznie, dołączane są kompensatory mocy bierniej (lub filtry aktywne) [10]-[13], pozwalające na zmniejszenie spadków napięć na linii zasilającej w trakcie przepływu prądów udarowych oraz zmniejszenie zawartości harmonicznych prądu. Takie rozwiązanie nie ogranicza jednak szczytowych wartości prądu linii i transformatora zasilającego, wynikających z udarów mocy czynnej.

Przeprowadzane są aktualnie eksperymenty, w których zastosowano superkondensatory jako magazyn energii. Alternatywą pozostaje wykorzystanie wirujących zasobników energii [8], [14], [15].

Koncepcja działania jednofazowego filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii

Na rys. 3 przedstawiono schemat odvodu mocy filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii, realizującego uprzednio założone cele. Układ jest dołączony do jednofazowej linii zasilającej, równolegle z obciążeniem.

Schemat blokowy obwodu mocy oraz strukturę sterowania i regulacji przedstawiono na rys. 4.

Analizowany filtr aktywny to falownik prądu w układzie mostka H, do wyjścia którego DC dołączono nieseparowany, dwukierunkowy przekształtnik DC/DC z dodatkowym zasobnikiem energii.

Łączniki wchodzące w skład mostka [16], [17], realizują unipolarną metodę modulacji PWM - dodatkowo redukując składową zmienną w prądzie, a co za tym idzie minimalizując wielkość dławika wyjściowego filtra L [18].

Zadanie falownika w badanej topologii sprowadza się do roli bufora i filtra aktywnego, odpowiedzialnego za właściwe kształtowanie prądu linii zasilającej (i_{linii}). Tak, aby otrzymać przebieg sinusoidalny i współfazowy z napięciem linii zasilającej, zgodnie z równaniem (1):

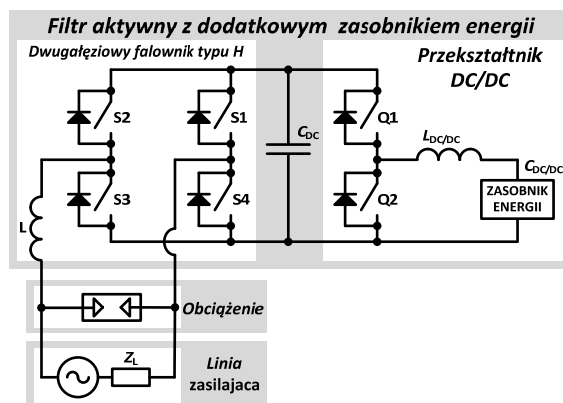
$$(1) \quad i_{linii}(t) = i_{filtr}(t) + i_{obc}(t)$$

gdzie:

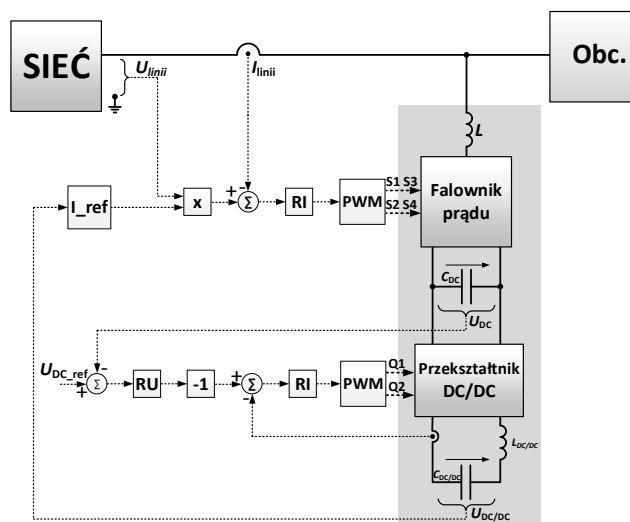
$$(2) \quad i_{linii}(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$A \approx const.$$

gdzie: ω - pulsacja napięcia sieci; φ - zadane przesunięcie fazowe



Rys. 3. Schemat układu filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii; S1-S4 łączniki wchodzące w skład struktury falownika prądu, Q1-Q2 łączniki wchodzące w skład przekształtnika DC/DC, Z_L - impedancja wewnętrzna linii zasilającej



Rys. 4. Schemat blokowy układu filtra z dodatkowym zasobnikiem energii oraz układem sterowania i regulacji

Przebieg prądu filtra kształtowany jest na podstawie aktualnej wartości chwilowej napięcia linii zasilającej przy założeniu iż napięcie linii nie jest odukształcone, w przeciwnym razie konieczne jest zastosowanie pętli fazowej PLL [19].

W analizowanej strukturze regulacji, przedstawionej na rys. 4 układ regulacji filtra nie posiada informacji o aktualnym poziomie napięcia na kondensatorze C_{DC} . Jego wartość nie wpływa bezpośrednio na zadawaną wartość prądu linii zasilającej, która skutkiem tego może być utrzymywana stała w czasie. Takie rozwiązanie wymusza jednak zastosowanie dodatkowego układu kontrolującego wartość tego napięcia i poziom zgromadzonej w układzie energii.

Za utrzymywanie odpowiedniego poziomu napięcia w obwodzie pośredniczącym DC (kondensator C_{DC}) odpowiedzialny jest układ dwukierunkowego nieseparowanego przekształtnika DC/DC [3], [7], [20]-[23].

Zastosowany przekształtnik umożliwia realizację dwóch trybów pracy:

- Buck - zmniejszanie napięcia wejściowego dzięki ładowaniu kondensatora $C_{DC/DC}$ na swoim wyjściu. Przepływ energii ze źródła o wyższym napięciu U_{DC} do źródła o niższym napięciu $U_{DC/DC}$;
- Boost - zwiększanie napięcia na wejściu U_{DC} kosztem energii uprzednio zgromadzonej w kondensatorze $C_{DC/DC}$.

Dwustanowa praca dwukierunkowego przekształtnika DC/DC jest realizowana za pomocą odpowiedniej kontroli współczynnika wypełnienia impulsów, sterujących pracą łączników Q1-Q2. Sygnały załączające oba łączniki są wzajemnie zanegowane co stanowi dodatkowe uproszczenie podczas realizacji sterowania tego rodzaju układów.

Układ odpowiedzialny za poprawną pracę przekształtnika DC/DC (rys. 4), opiera się na klasycznej kaskadowej strukturze regulacji. Zapewnia ona stabilizację napięcia na wejściu przekształtnika (U_{DC}), a nie jak w przypadku konwencjonalnych rozwiązań, napięcia na jego wyjściu ($U_{DC/DC}$). Zmiana ta pociąga za sobą konieczność odwrócenia kierunku (znaku) referencji prądu (pochodzącej z regulatora napięcia RU). Stąd niezbędny iloczyn tego sygnału z wartością „-1”, w torze referencji prądu w celu poprawnego działania układu.

W omawianym układzie referencja prądu realizowanego przez układ filtru (I_{ref}) jest związana z sygnałem proporcjonalnym do napięcia $U_{DC/DC}$ na kondensatorze przekształtnika DC/DC, a nie jak w przypadku konwencjonalnych struktur sterowania o pętli zamkniętej [3], [5] z sygnałem wyjściowym regulatora napięcia (o strukturze P lub PI), na którego wejście podawany jest uchyb napięcia U_{DC} na kondensatorze filtru.

Poprawne warunki pracy układu są zapewnione, gdy poziom napięcia $U_{DC/DC}$ przekształtnika nie przekroczy wartości, powyżej której każda kolejna jej porcja mogłaby spowodować jego uszkodzenie. Odpowiada to zadaniu zbyt dużej wartości prądu (konieczność magazynowania nadmiaru energii). Natomiast, zadanie prądu o zbyt małej wartości, nie zagwarantuje poprawnej stabilizacji napięcia filtru U_{DC} przez układ przekształtnika. Minimalny poziom napięcia $U_{DC/DC}$ to 1/3 przyjętej wartości referencyjnej. Odpowiada to zaledwie 11%, energii gromadzonej przy napięciu nominalnym kondensatorowego zasobnika, co wyklucza dalszą pracę.

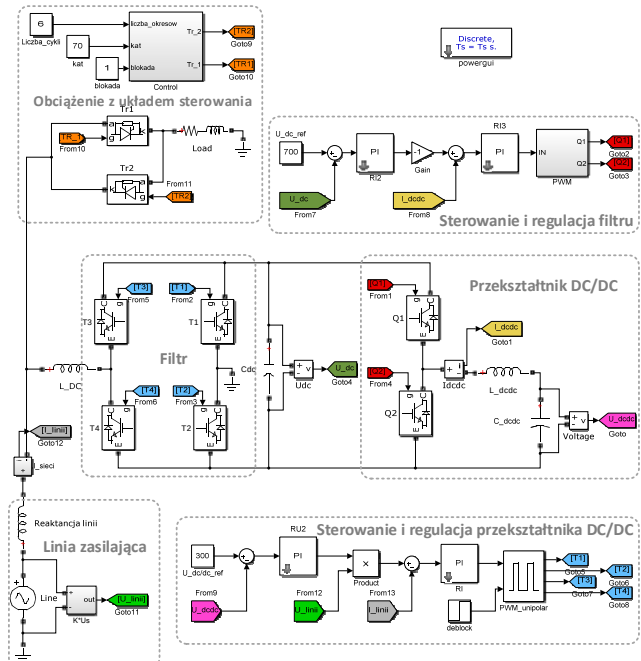
Od układu regulacji należy zatem oczekiwać wypracowania sygnału proporcjonalnego do prądu zadawanego o odpowiednio małej wartości, gwarantującego zachowanie odpowiedniego poziomu napięcia, kondensatora magazynującego energię. (bez możliwości przekroczenia wartości maksymalnej), zwłaszcza pomiędzy kolejnymi załączeniami obciążenia.

Zadaniem regulatora kształtującego referencję prądu I_{ref} jest zatem odpowiedni rozkład w czasie wartości maksymalnej prądu, wymuszanej przez skokowo załączane obciążenie, kosztem energii uprzednio zgromadzonej w zasobniku układu oraz uzupełnienie jej niewielkim prądem, gwarantującym poprawne zadziałanie przy kolejnym załączeniu obciążenia, bez konieczności skokowej zmiany zadawanej wartości prądu linii zasilającej.

Jedną z metod realizacji tych założeń jest wykorzystanie regulatora typu PI, o niewielkiej wartości wzmocnienia członu proporcjonalnego i o czasie zdwojenia członu całkującego będącym wielokrotnością maksymalnego dopuszczalnego (założonego) odstępu między kolejnymi załączeniami obciążenia. Warunek ten determinuje również ewentualne wyłączenie układu w przypadku, gdy załączenie obciążenia nie wystąpiło po maksymalnym oczekiwanym czasie. Wartość skuteczna prądu linii zasilającej I_{linii} zostanie wtedy zmniejszona do zera.

Rezultaty badań symulacyjnych

Badania układu przeprowadzono za pomocą modelu, zrealizowanego w środowisku Matlab & Simulink, którego schemat blokowy, wraz z naniesionym podziałem na sekcje przedstawiono na rys. 5.



Rys.5. Model symulacyjny układu zrealizowany w środowisku Matlab & Simulink

W trakcie prac nad układem wykorzystano przebiegi prądów zarejestrowanych na zrealizowanym modelu zgrzewarki punktowej (przedstawionej na rys. 6), podczas zgrzewania blach o grubości ok. 0.25 mm.

Przedstawiony na rys. 6 układ sterownika zgrzewarki umożliwia płynną nastawę prądu zgrzewania przez zmianę kątaysterowania tyrystorów, a także płynną nastawę czasu pracy. Odmierzanie czasu odbywa się poprzez zliczanie okresów napięcia linii zasilającej.

Liczba cykli (pełnych okresów napięcia zasilającego przez które układ jest załączony) wynika m.in. z grubości elementów podlegających procesowi zgrzewania. Odstępy pomiędzy kolejnymi załączeniami układu są rezultatem procesu technologicznego, w wyniku którego elektrody, bądź materiał muszą zmienić położenie, co bezpośrednio określa chwilę ponownego załączenia układu.

W przypadku zgrzewarek impulsy załączające tyrystory są synchronizowane względem przejścia przez zero napięcia linii zasilającej. Odpowiedni z tyrystorów rozpocznie przewodzenie dopiero w chwili, gdy nastąpi zetknięcie i docięnięcie elektrod ze zgrzewanym materiałem oraz, gdy zostanie on spolaryzowany w kierunku przewodnia.

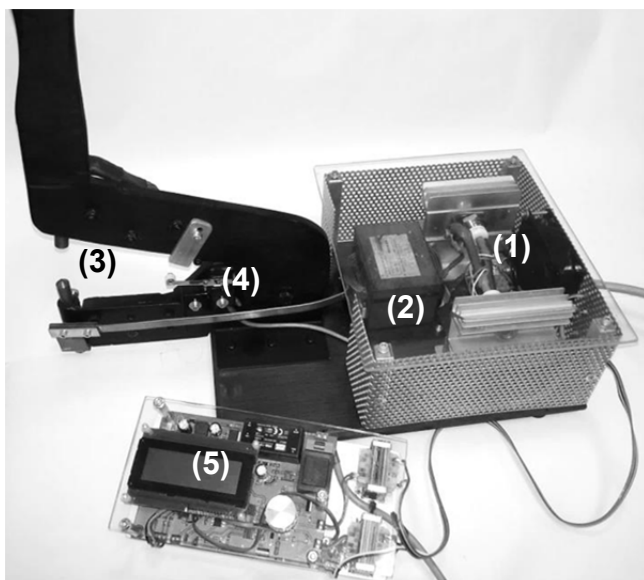
W badaniach symulacyjnych zgrzewarkę (transformator, i jego stronę wtórną) odzwierciedlono za pomocą odpowiednio dobranych elementów modelu zastępczego RL.

Zasadność analizy tak uzyskanych przebiegów wynika z tego, iż mogą one posłużyć przede wszystkim odpowiedniemu zwiaryowaniu (m.in. na podstawie energii pobranej w ciągu jednego cyklu - okresu) projektowanego filtru jak i bardziej kompletnej analizie zjawisk na poziomie symulacji.

Przebiegi prądów i napięcia linii zasilającej podczas procesu zgrzewania przedstawiono na rys. 7. Analizy dokonano dla wybranych kątów opóźnienia załączenia tyrystorów występujących w układzie, zadawanych z przedziału (3):

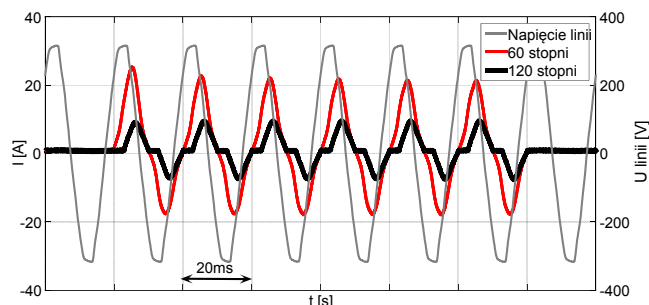
$$(3) \quad \varphi \leq \alpha \leq \pi$$

gdzie: α - zadany kąt opóźnienia załączania tyrystorów; φ - kąt fazowy charakteryzujący urządzenie (w analizowanym przypadku równy ok. 60°)

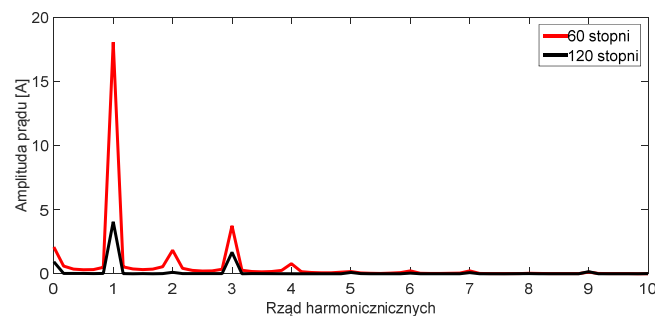


Rys.6. Zrealizowany model zgrzewarki punktowej; (1)- łączniki tyrystorowe wraz z układem chłodzenia, (2)- transformator obniżający napięcie, (3)- układ elektrod, (4)- krawcówka inicjująca proces zgrzewania, (5)- sterownik zgrzewarki

Praca z kątami $\alpha < \phi$ powoduje wystąpienie w przebiegach prądu składowej zerowej jak również harmonicznych parzystych rzędów. Mogących negatywnie oddziaływać na inne obiekty np. transformatory, powodując dodatkowe straty związane z przemagnesowaniem rdzenia. Dodatkowo charakter generowanych prądów może być zbliżony do prądów występujących podczas zwarć, w których przebiegu daje się zaobserwować składową nieokresową (przejściową) i_{DC} [24].



Rys.7. Przebiegi prądu i napięcia linii zasilającej podczas procesu zgrzewania dla wybranych opóźnień załączenia



Rys.8. Widmo harmonicznych przebiegu prądu podczas procesu zgrzewania dla wybranych opóźnień załączenia

Opracowany układ sterowania posiada zaimplementowaną korektę czasu załączenia, ze względu na charakter RL obwodu zgrzewarki. Zadanie minimalnej wartości kąta opóźnienia załączania tyrystorów odpowiada w rzeczywistości pracy z kątem równym $\alpha = \phi = 60^\circ$.

Dla kątów opóźnienia $\alpha \leq \pi/2$, przebiegi prądu mają kształt sinusoidalny. Zamieszczone na rys. 8 widmo,

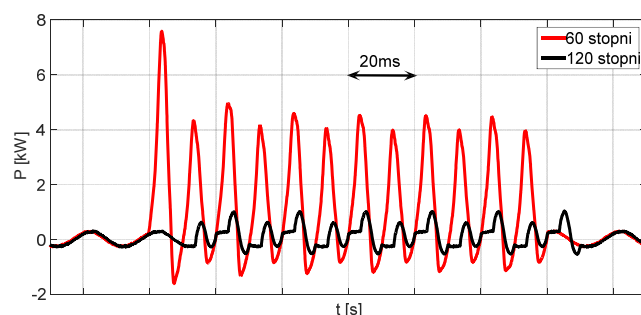
potwierdza obecność w prądzie również harmonicznych nieparzystych rzędów.

Wzrost kątaysterowania $\alpha > \pi/2$ powoduje nie tylko redukcję harmonicznej podstawnej prądu, lecz również nieciągłość w jego przebiegu czasowym. Większe znaczenie zaczynają również odgrywać harmoniczne nieparzystych rzędów.

Przesunięcie fazowe podstawowych harmonicznych prądu i napięcia jest rezultatem zmiany kąta opóźnienia załączenia tyrystorów jak i reaktancji transformatora. Oznacza to że zgrzewarka powoduje przepływ przez linie zasilającą także prądu biernego, powodując tym samym dodatkowe spadki napięcia.

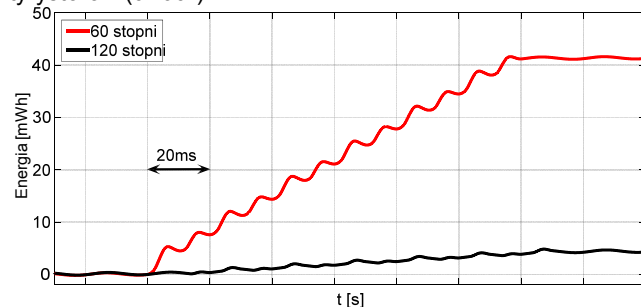
Przebiegi zamieszczone na rys. 7 posłużyły wyznaczeniu chwilowych wartości mocy czynnej w trakcie pracy zgrzewarki (rys. 9).

Linia zasilająca (np. aparatura rozdzielcza, transformator) jest obciążany skokowo zmienną mocą o znacznych wartościach chwilowych. Jedyne przez krótkie odcinki czasu. W omawianym przypadku w moc szczycie dochodzi nawet do 7.6 kW.



Rys.9. Przebiegi chwilowej wartości mocy czynnej w trakcie procesu zgrzewania dla wybranych opóźnień załączenia

Przebiegi mocy chwilowej wykorzystano do wyznaczania energii pobieranej przez układ w trakcie pojedynczego załączenia, co zilustrowano na rys. 10. W trakcie pracy zgrzewarka pobiera z linii zasilającej energię równą ok. 42 mWh (152 J) w przypadku pracy z minimalnym dopuszczalnym kątem opóźnienia załączenia tyrystorów ($\alpha = 60^\circ$).



Rys.10. Energia pobierana z linii zasilającej przez zgrzewarkę w trakcie procesu zgrzewania dla wybranych opóźnień załączenia

Wartość pojemności C_{DC} została wyznaczona w wyniku przekształcenia zależności opisującej energię zgromadzoną przez kondensator (4), tak aby jej wartość za okres, podczas pracy z maksymalną mocą obciążenia nie spadała poniżej progu gwarantującego poprawną pracę:

$$(4) \quad C_{DC} \geq \frac{2P_{\max}}{f_i (U_{DC_ref}^2 - U_{DC_min}^2)}$$

gdzie: $P_{\max}$ - maksymalna moc czynna obciążenia; f_i - częstotliwość podstawowej harmonicznej; U_{DC_ref} - wartość zadana napięcia na kondensatorze C_{DC} ; U_{DC_min} - minimalne napięcie na kondensatorze C_{DC}

Przy założeniu stabilizacji napięcia U_{DC} na poziomie 500 V, minimalnej wartości na poziomie 420 V oraz pracy z mocą nie przekraczającą 1 kW przy częstotliwości 50 Hz, dobrano kondensator o pojemności 400 μ F, uwzględniony następnie w wykorzystywanym modelu.

Kluczowym zagadnieniem w analizowanym układzie jest dobór pojemności kondensatora $C_{DC/DC}$. Ilość gromadzonej przez niego energii ($E_{DC/DC}$) przekłada się bowiem na szybkość zmian prądu realizowanego przez filtr oraz jego minimalną wartość.

Zwiększenie ilości magazynowanej energii (np. przez zastosowanie zasobnika o większej pojemności), umożliwia zastosowanie wolniejszego regulatora I_{ref} , a przez to lepsze uśrednianie w czasie wypracowywanej referencji prądu linii zasilającej.

Zbyt mała wartość pojemności zasobnika wymusza z kolei pracę z większym prądem linii (lub większymi wahaniami jego wartości skutecznej) tak aby załączenie obciążenia nie powodowało znaczących zmian poziomów energii w znajdujących się w układzie kondensatorach, a układ zachował możliwości kompensacyjne.

Energia zgromadzona w kondensatorze $C_{DC/DC}$ powinna kompensować ubytki energii (E_{DC}) w kondensatorze C_{DC} w czasie pracy obciążenia (zgrzewarki), bez konieczności zmiany wartości realizowanego prądu linii zasilającej.

W analizowanym przypadku energia $E_{DC/DC}$ stanowi wielokrotność energii pobieranej przez obciążenie w trakcie jednego okresu pracy z mocą maksymalną ($\alpha=60^\circ$). Dla przewidzianej maksymalnej liczby okresów na jakie jest załączone badane obciążenie (5):

$$(5) \quad E_{DC/DC} > n \cdot E_{OBC(1)}$$

gdzie: n - założona maksymalna liczba okresów pracy obciążenia z mocą maksymalną podczas jednego cyklu załączenia, $E_{OBC(1)}$ - energia pobierana przez obciążenie w trakcie jednego okresu załączenia

W wyniku przeprowadzonych analiz dobrano kondensator o pojemności 4700 μ F, pracujący z napięciem referencyjnym o wartości 300 V.

Kluczowe znaczenie w omawianym przypadku ma dobór optymalnego napięcia pracy kondensatora $C_{DC/DC}$, ze względu na funkcje realizowane przez układ przekształtnika DC/DC.

Kondensator $C_{DC/DC}$ musi pracować z napięciem niższym niż napięcie referencyjne kondensatora C_{DC} (500 V), aby praca przekształtnika trybie buck była możliwa. Natomiast minimalna wartość tego napięcia, poniżej której praca w trybie boost jest niemożliwa, wynosi ok. 100 V.

W analizowanym przypadku przyjęte napięcie referencyjne $U_{DC/DC}$ (300 V) znajduje się w środku przedziału ograniczonego maksymalną dopuszczalną wartością napięcia na kondensatorze $C_{DC/DC}$ (500 V), a minimalną wynoszącą 100 V.

Energia $E_{DC/DC}$ zgromadzona przy tym napięciu zapewnia poprawną pracę układu dla maksymalnej założonej liczby cykli, na które obciążenie jest załączane. Jednocześnie dobrana wartość pojemności gwarantuje odpowiedni zapas na ewentualne magazynowanie energii.

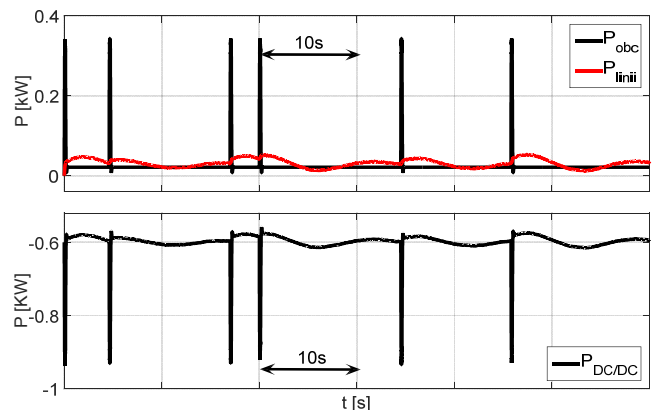
Praca z kątem $\alpha=60^\circ$ oznacza konieczność pobrania z linii zasilającej ok. 26 J energii, w trakcie tylko jednego okresu pracy.

Energia zgromadzona w kondensatorze C_{DC} dla założonych warunków pracy wynosi ok. 50 J, a jej poziom gwarantuje zapas energii na co najmniej jeden okres pracy obciążenia. W kondensatorze $C_{DC/DC}$ zgromadzono natomiast 212 J.

Bilans energetyczny na podstawie tych wartości potwierdza iż energia zgromadzona w przekształtniku

DC/DC i filtrze zapewni poprawne warunki pracy układu, bez konieczności ingerowania w wypracowaną referencję prądu w trakcie załączenia obciążenia.

W wyniku badań symulacyjnych przeprowadzonych na opracowanym modelu zarejestrowano przebiegi mocy średniej (rys. 11): linii zasilającej, obciążenia oraz w obwodzie przekształtnika DC/DC.



Rys.11. Przebiegi mocy czynnej zarejestrowanej w wybranych punktach układu: a) linii zasilającej; b) obciążenia; c) obwodzie przekształtnika DC/DC

Przeprowadzony bilans mocy potwierdza wysoką skuteczność omawianego rozwiązania. Opracowany model filtru uwzględnia jedynie niewielkie straty przewodzenia na tyrystorach. Wobec czego został on pominięty podczas analizy.

Maksymalna wartość średniej mocy czynnej obciążenia, wynosi ok. 0.86 kW. Obciążenie załączane przypadkowo na 6 okresów napięcia linii zasilającej.

Podczas pracy układu moc linii zasilającej uległa znacznemu obniżeniu, a jej wartość nie przekracza 0.13 kW. Ponad to jest już dostarczana na praktycznie stałym w czasie poziomie. A w jej przebiegu nie występują znaczące wahania – udary, pochodzące od obciążenia.

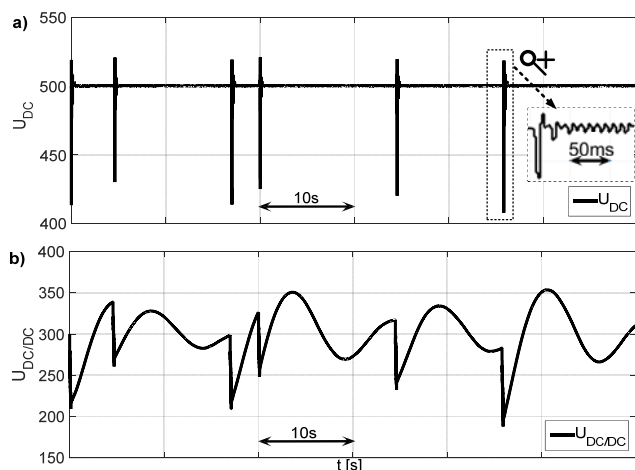
Pomiaru mocy dokonano za pomocą operacji uśredniania przebiegu mocy chwilowej z wykorzystaniem filtru dolnoprzepustowego, drugiego rzędu, o częstotliwości drgań własnych 10 Hz.

Przebieg mocy w obwodzie przekształtnika DC/DC (rys. 11b) potwierdza, iż załączenie obciążenia nie powoduje znaczącego zwiększenia się mocy czynnej dostarczanej z linii zasilającej, a jedynie jej ubytek energii w obwodzie przekształtnika DC/DC. Oznacza to w praktyce brak konieczności dodatkowego pomiaru prądu zgrzewarki w celu oszacowania mocy obciążenia. Co stanowi istotne uproszczenie podczas implementacji cyfrowej.

Na rys. 13 przedstawiono przebieg wartości chwilowej napięcia U_{DC} oraz $U_{DC/DC}$.

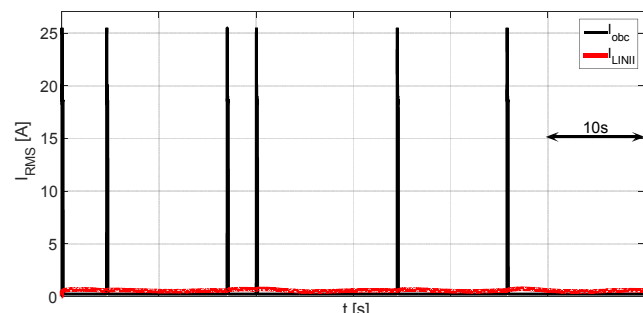
Występujące w przebiegu U_{DC} spadki (szpilki) napięcia, świadczą o załączaniu obciążenia. Jednakże wartość tego napięcia jest stabilizowana w odpowiednim stopniu kosztem energii zgromadzonej w przekształtniku DC/DC.

Zadana przez regulator wartość prądu linii gwarantuje utrzymanie wartości średniej napięcia $U_{DC/DC}$ w przedziale gwarantującym poprawną pracę układu (możliwość stabilizacji napięcia U_{DC}). A wartość tego napięcia oscyluje wokół wartości zadanej (300 V) nie przekraczając wartości 500 V, powyżej której mógłby ulec uszkodzeniu kondensator. Maksymalna wartość udaru - podskoku napięcia przyjęta dla analizowanego kondensatora to 550 V. Ewentualne przekroczenie tej wartości jest uniemożliwione dzięki zastosowaniu zamkniętej struktury regulacji tego napięcia.



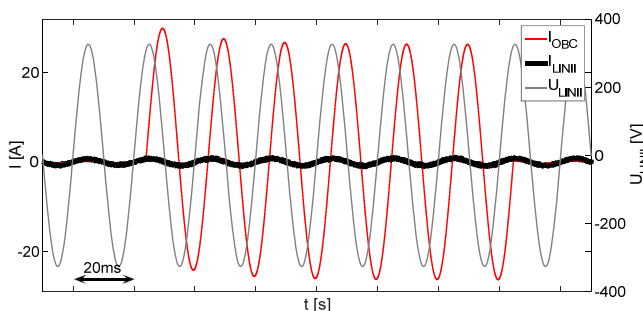
Rys.13. Przebiegi napięcia: a) U_{DC} na kondensatorze filtru; b) $U_{DC/DC}$ na kondensatorze przetwornicy DC/DC

Potwierdzeniem skuteczności działania badanego układu są zaprezentowane na rys. 14 przebiegi wartości skutecznej prądów: wywołanego przez obciążenie oraz płynącego przez linię zasilającą podczas pracy filtru. Wartość skuteczna prądu wymuszanego przez przypadkowo załączaną zgrzewarkę wynosi ok. 25 A. Natomiast dzięki zastosowaniu omawianego rozwiązania utrzymuje się na praktycznie stałym w czasie poziomie nie przekraczając 2 A. Oznacza to ponad 12-krotną redukcję wartości prądu przepływającego przez linię zasilającą. Przy przyjętych założeniach dotyczących częstotliwości włączania i czasu trwania pojedynczego zgrzewu oraz jego mocy, co było głównym założeniem podczas projektowania układu.



Rys.14. Przebiegi wartości skutecznej prądu generowanego przez obciążenie (I_{OBC}) oraz widocznego z punktu linii zasilającej (I_{LINII})

Układ zachował również funkcje filtru aktywnego. Czego potwierdzeniem są przebiegi wartości chwilowych prądu i napięcia linii zasilającej, podczas pracy układu w chwili załączenia obciążenia, przedstawione na rys. 15. Prąd linii ma charakter sinusoidalny i współfazowy z napięciem linii, a złączenie obciążenia nie ma już znaczącego wpływu na zmianę jego wartości.



Rys.15. Przebiegi prądu i napięcia linii zasilającej w chwili załączania obciążenia, podczas pracy filtru aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii

Podsumowanie

Przedstawiona w artykule koncepcja układu filtru aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii oraz przeprowadzone badania wykazały wysoką efektywność proponowanego rozwiązania. Zaprezentowane wyniki, wykonane na specjalnie w tym celu opracowanym modelu zilustrowały podstawowy stan pracy urządzenia oraz poprawną realizację stawianych mu celów.

Bardzo istotnym zagadnieniem podczas badań nad tego typu układami, ze względu na stawiane im wymagania jest bilans energetyczny - przekładający się na wielkość zastosowanych w układzie magazynów energii. Analiza przebiegów rzeczywistych prądów, podczas procesu zgrzewania na zrealizowanym obiekcie zgrzewarki demonstruje naturę zjawisk występujących w tego typu układach - pracujących dorywczo.

Przeprowadzone badania umożliwiły m.in. zwymiarowania elementów pasywnych występujących w strukturze jak i przetestowanie skuteczności badanego rozwiązania już na poziomie symulacji.

Stołość amplitudy wartości chwilowej mocy czynnej, pobieranej ze źródła - linii zasilającej odbywa się kosztem energii uprzednio zgromadzonej w zasobniku oraz falowniku prądu.

Ze względu losowe załączenia obciążenia oraz ich dowolny charakter, dalsza optymalizacja pracy omawianej konstrukcji będzie wymagała udoskonalenia sterowania (m.in. optymalizacji nastaw regulatorów i opracowania algorytmu na wypadek przekraczania granicznych wartości parametrów projektowych).

Ta praca powstała dzięki funduszom z Grantu Dziekańskiego nr. 15.11.120.536 w roku 2015 pt „Jednofazowy energetyczny filtr aktywny z zasobnikiem energii dla kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej”.

Dodatek

Tabela 1. Parametry elementów pasywnych w układzie oraz poziomy napięcie

C_{DC}	400 [μ F]
L	4 [mH]
$C_{DC/DC}$	4700 [μ F]
$L_{DC/DC}$	2.8 [mH]
U_{DC}	500 [V]
$U_{DC/DC}$	300 [V]

Autorzy: mgr inż. Kacper Sowa, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 31-038 Kraków, E-mail: sowa@agh.edu.pl;

dr inż. Marcin Baszyński, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 31-038 Kraków, E-mail: mbaszyn@agh.edu.pl;

prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 31-038 Kraków, E-mail: pirog@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Hanzelka Z., Jakość dostawy energii elektrycznej: zaburzenia wartości skutecznej napięcia, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, (2013)
- [2] Benysek G., Improvement in the quality of delivery of electrical energy using power electronics systems, Springer, (2007)
- [3] Piróg S., Energoelektronika: układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, (2006)
- [4] Bień A., Systemy pomiarowe w elektroenergetyce, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, (2013)

- [5] Kunjumammed L. P., Mishra M. K., Comparison of single phase shunt active power filter algorithms, *Power India Conference IEEE*, (2006)
- [6] Senderski A., Formułowanie modeli symulacyjnych układów energoelektronicznych, *AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne*, (2013)
- [7] Park C.H., Jang S.J., Lee B.K., Won C.Y., Lee H.M., Design and control algorithm research of active regenerative bidirectional DC/DC converter used in electric railway, *Power Electronics 7th International Conference on*, 790-794, (2007)
- [8] Xiao-li Ch., Da-qiang L., Wei-dong Z., Braking energy recovery for electric traction based on super-capacitor and Bidirectional DC-DC converter, *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, vol.2, 879-883, (2012)
- [9] Steiner M., Klohr M., Pagiela S., Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles, *Power Electronics and Applications, European Conference on*, 1-10, (2007)
- [10] Chiang H., Lin B., Yang K., Wu K., Hybrid Active Power Filter for power quality compensation, *Power Electronics and Drives Systems, International Conference on*, vol.2, 949-954, (2005)
- [11] Lam C., Choi W., Wong M., Han Y., Adaptive DC-Link Voltage-Controlled Hybrid Active Power Filters for Reactive Power Compensation, *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.27, 1758-1772, (2012)
- [12] Marrouchi S., Chebbi S., Active and reactive power compensation through a preventive defense strategy based on FACTS devices, *Electrical Engineering and Software Applications, 2013 International Conference on*, 1-5, (2013)
- [13] Alcalá J., Cardenas V., Miranda H., Perez-Ramirez J., Charre S., A three-phase back-to-back converter for reactive power compensation, current harmonic filtering and active power compensation, *Energy Conversion Congress and Exposition*, 2371-2377, (2013)
- [14] Al-Diab A., Sourkounis C., Voltage drops mitigations using flywheel energy storage system in production lines, *Control & Automation, 19th Mediterranean Conference on*, 868-873, (2011)
- [15] Al-Diab A., Sourkounis C., Integration of flywheel energy storage system in production lines for voltage drop compensation, *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 3882-3887, (2011)
- [16] Wu B., *High-Power Converters and AC Drives*, Wiley-IEEE Press, (2006)
- [17] Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J., High Performance Control of AC Drives with Matlab/Simulink Models, *John Wiley & Sons*, (2012)
- [18] Barlik R., Nowak M., *Energoelektronika. Elementy, podzespoły, układy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, (2014)
- [19] Best R. E., Phase-locked loops: design, simulation, and applications, *New York: McGraw-Hill*, (2003)
- [20] Kazimierczuk M. K., Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, *John Wiley & Sons*, (2008)
- [21] Richelli A., Comensoli S., Kovacs Z. M., A DC/DC Boosting Technique and Power Management for Ultralow-Voltage Energy Harvesting Applications, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.59, 2701-2708, (2012)
- [22] Lai Y., Chen B., New Random PWM Technique for a Full-Bridge DC/DC Converter With Harmonics Intensity Reduction and Considering Efficiency, *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.28, 5013-5023, (2013)
- [23] Zhang X., Tong D., Ding H., Xu D., Research of digital control bidirectional DC/DC converter based on ultra-capacitor, *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, vol.3, 1545-1549, (2012)
- [24] *Poradnik inżyniera elektryka*, Tom 3, *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, (2011)