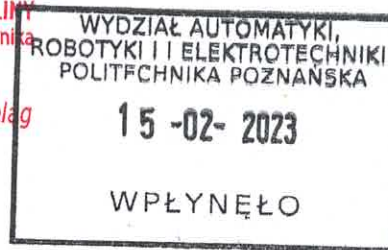


Prof. dr hab. inż. Piotr J. Chrzan,
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Politechnika Gdańska



Gdańsk, 09.02.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Ciepłińskiego
pt.: "Aktywna kompensacja równoległa przy użyciu zasilacza sieciowego z
przestrajalnym filtrem indukcyjnym"

Opinia o rozprawie została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki
Poznańskiej z dnia 07.12.2022 r.

1. Obszar problemowy rozprawy

Utrzymanie wysokiej jakości energii elektrycznej w sieciach prądu przemiennego wymaga różnego rodzaju metod kompensacji mocy biernej oraz mocy odkształcenia generowanej przez wciąż powiększający się udział odbiorników nieliniowych. Jednym ze skutecznie stosowanych narzędzi do poprawy jakości energii elektrycznej są równoległe energetyczne filtry aktywne, które zapewniają kompensację zniekształceń harmonicznego prądu, mocy biernej oraz asymetrii wnoszonych przez odbiorniki nieliniowe. Pomimo wieloletnich prac badawczych i przemysłowych wdrożeń filtrów aktywnych, opracowania innowacyjnych rozwiązań układowych, oraz metod ich sterowania są wciąż obecne w literaturze przedmiotu.

Wychodząc naprzeciw tej problematyce, w niniejszej rozprawie Autor rozważył metodę aktywnej kompensacji równoległej, realizowanej przez zasilacz sieciowy prądu stałego. Zaproponowana metoda bazuje na koncepcji kompensacji rozproszonej realizowanej przez niezależne urządzenia, których zadaniem jest odpowiednie kształtowanie prądu na swoim wejściu w stosunku do przebiegu prądu wymuszanego przez inne, w tym nieliniowe odbiorniki dołączone do tego samego węzła sieci. Opracowany zasilacz-kompensator jest wspomagany przestrajalnym filtrem indukcyjnym. Badania zostały przeprowadzone w środowisku symulacyjnym ORCAD/PSpice oraz na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w przekształtnik energoelektroniczny z mikroprocesorowym systemem uruchomieniowym.

2. Cel i zakres rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku polskim i liczy 112 stron. Składa się z ośmiu rozdziałów, podsumowania i bibliografii.

W części wstępnej, po krótkim wprowadzeniu jako cel rozprawy Autor określił: *„Układ aktywnej kompensacji równoległej, realizowanej przez zasilacz sieciowy prądu stałego wspomagany przestrajalnym filtrem indukcyjnym, którego zadaniem jest kształtowanie prądu na swoim wejściu, w stosunku do przebiegu prądu wymuszanego przez inne nieliniowe odbiorniki, dołączone w punkcie wspólnego przyłączenia, tak aby sumaryczny prąd dopływający do węzła sieci był sinusoidalny i umożliwił pobór z sieci mocy czynnej.”*

Celem i motywacją rozprawy jest zatem, poprzez zastosowanie dwufunkcyjnego zasilacza-kompensatora, opracowanie innowacyjnej metody aktywnej kompensacji równoległej. Pomimo małej mocy pojedynczego zasilacza-kompensatora, w przypadku zastosowania ich dużej ilości w systemie energetycznym – mogłyby służyć kompensacji rozproszonej. W kolejnych rozdziałach rozprawy zawarto: strukturę, metodę sterowania oraz otrzymane wyniki poprawy jakości działania takiego zasilacza-kompensatora wspomaganego indukcyjnym filtrem przestrajalnym.

W rozdziale trzecim przedstawiono jednofazowy zasilacz sieciowy mostkowy z wejściowym filtrem indukcyjnym, który pracuje w trybie sterowanego źródła prądu. Filtr indukcyjny tłumi składową nośną modulacji impulsowej prądu zasilacza, lecz jednocześnie ogranicza pasmo regulacji sterowanego źródła prądu. Przy skokowych zmianach prądu odbiorników jak w przypadku sterowników prądu przemiennego, jakość kompensacji ulegnie pogorszeniu. Zaproponowana przez Autora koncepcja przestrajania indukcyjności filtra, współbieżnie z przebiegiem napięcia sieci zakłada powiększenie pasma regulacji prądu przy jednoczesnym ograniczeniu amplitudy impulsów modulacyjnych.

Spośród opisanych w czwartym rozdziale wariantów rozwiązań przestrajalnego filtra indukcyjnego wybrano do realizacji układ transformatora z pojedynczym uzwojeniem wtórnym, połączonym z mostkiem prostowniczym zwierzanym łącznikiem tranzystorowym w obwodzie prądu stałego zasilacza. W oparciu o badania symulacyjne i eksperymentalne określono liczbę zwojów oraz szerokość szczeliny powietrznej w

rdzeniu transformatora zapewniającą wymaganą dwustanową zmianę indukcyjności. Otrzymane w stanie quasi-ustalonym przebiegi prądu przy dwubiegunowej zmianie napięcia podanego na uzwojenie pierwotne filtra – potwierdzają zmiany indukcyjności: 4,5/1,5 mH odpowiednio dla rozwartego i zwartego uzwojenia wtórnego w liniowym zakresie pracy rdzenia magnetycznego. Z uwagi na dynamiczne przestrajanie filtra, gdy regulator prądu wchodzi w stan ograniczenia, istotnym uzupełnieniem tego rozdziału byłaby analiza dynamiki procesu przestrajania filtra (stałych czasowych zmiany indukcyjności).

W kolejnym rozdziale piątym wyjaśniono schemat cyfrowego układu sterowania zasilaczem-kompensatorem. W układzie tym należy wyróżnić autorskie rozwiązania obejmujące: korektor wartości sygnału referencyjnego z filtrem antytętnieniowym dla regulatora napięcia oraz blok synchronizacji sygnału referencyjnego z napięciem sieci. W podrozdziale dotyczącym syntezy regulatora prądu brakuje informacji o transmitancji obiektu regulacji (źródła prądu sterowanego napięciem). Chociaż Autor sygnalizuje, że odpowiednie obliczenia zostały przeprowadzone w oparciu o małosygnałowy model źródła prądowego.

Modelowanie i symulację zasilacza, w rozdziale szóstym, przeprowadzono w środowisku ORCAD/PSpice. Na podkreślenie zasługuje cyfrowe odwzorowanie układu sterowania w modelu symulacyjnym. Jako odbiornik nieliniowy zastosowano sterownik prądu przemiennego pracujący z kątem załączania 90° (najbardziej niekorzystnym względem zniekształceń prądu). Wyniki symulacji potwierdziły korzystne zmniejszenie współczynnika zawartości harmonicznych TWD oraz skrócenie stanu przejściowego regulacji prądu dzięki zaproponowanej metodzie przestrajania indukcyjności filtra. Uzyskano również wysoką jakość regulacji napięcia w obwodzie prądu stałego zasilacza.

W kolejnym etapie dla osiągnięcia celu rozprawy (rozdział siódmy) przeprowadzono weryfikację laboratoryjnego modelu zasilacza-kompensatora o mocy 1,2 kW w oparciu o przekształtnik P3-5-550MFE LABINVERTER z mikroprocesorowym systemem uruchomieniowym ALS-G3-1369. Otrzymane wyniki eksperymentalne są w dużej mierze zgodne z wynikami symulacyjnymi. Potwierdzają dokładność algorytmów identyfikacji parametrów i synchronizacji sygnału referencyjnego z napięciem sieci

przy zmianach amplitudy, częstotliwości oraz wobec zniekształceń harmoniczných. Podobnie, przebiegi prądu w punkcie wspólnego przyłączenia ilustrują poprawę jakości regulacji, poprzez skrócenie stanów przejściowych oraz zmniejszenie współczynnika zniekształceń harmoniczných TWD, w wyniku przestrajania indukcyjności filtra.

W ostatnim rozdziale ósmym, przedstawiono koncepcję dalszej poprawy jakości regulacji prądu oraz sterowania filtrem przestrajalnym, w przypadku wykonania tych układów w wersji analogowej. Do podstawowych czynników, które ograniczają techniki regulacji cyfrowej Autor zalicza zjawiska aliasingu, opóźnienia torów przetworników A/C oraz nadmierne koszty szybkich procesorów sygnałowych. Niemniej, układy analogowe cechują wolnozmienné napięcia niezrównoważenia i dryftu, efekty starzeniowe, szумы elementów, stąd wybór optymalnej techniki realizacji powinien każdorazowo wynikać z kompromisu projektowego. Wstępne badania symulacyjne analogowej wersji regulatora prądu z układem przestrajania filtra wskazują na poprawę jakości pracy zasilacza-kompensatora.

3. Uwagi ogólne

Do uwag i pytań, jakie nasunęły mi się podczas czytania rozprawy należą:

1. W podrozdziale dotyczącym syntezy regulatora prądu brakuje informacji o transmitancji obiektu regulacji (źródła prądu sterowanego napięciem). Proszę o bliższe wyjaśnienie procedury wymiarowania parametrów regulatora, tj.: jego wzmocnienia i częstotliwości charakterystycznych.
2. Jaka jest dynamika (stałe czasowe) procesu przestrajania filtra? Nieliniowy podokres pracy regulatora prądu po chwili wyjścia ze stanu ograniczenia wprowadza niekorzystne, z uwagi na zakłócenia, oscylacyjne przełączenia tranzystora kluczującego przestrajaniem filtra. Z uwagi na wysoką częstotliwość tych drgań proszę o analizę - czy efektem tych przełączeń jest faktyczna poprawa jakości regulacji prądu, czy jest to wynik zbyt dużego wzmocnienia w pętli regulacji prądu?
3. Jaka była laboratoryjna metoda pomiaru przyjętego w pracy współczynnika zawartości harmoniczných prądu TWD i wynikająca stąd efektywna szerokość pasma, w którym ten współczynnik był wyznaczany?

4. Uwagi szczegółowe

W uwagach szczegółowych wskazano dostrzeżone błędy edycyjne i drobne błędy terminologiczne:

1. str. 34, wzory (4.9-11): brak indeksu $X \rightarrow X_1$
2. str. 40: ...autorski, dynamiczny model sieci z zaburzeniami [83] – ta pozycja literatury nie jest dziełem Autora rozprawy.
3. str. 62: ...czas trwania stanu przejściowego „spada” \rightarrow „zmniejsza się”
4. str. 63, rys. 6.4: ilustruje przebieg sygnału uchybu regulacji prądu ..., podobnie wzór (6.1) definiuje unormowany wskaźnik uchybu regulacji prądu.

5. Ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi rozszerzenie wiedzy teoretycznej oraz doświadczalnej dotyczącej kompleksowego układu i metody aktywnej kompensacji równoległej przy użyciu zasilacza sieciowego z przestrajalnym filtrem indukcyjnym. Rozważania analityczne i badania symulacyjne zostały zweryfikowane wynikami eksperymentu. Końcowe wnioski i podsumowanie w pełni wynikają z otrzymanych wyników szczegółowych. Uważam, zatem że cel pracy został osiągnięty.

Obszerna bibliografia rozprawy obejmuje 103 pozycje naukowe i techniczne charakteryzujące światową literaturę tematu rozprawy. Własny dorobek Autora, na podstawie bazy *Web of Science*, zawiera 11 współautorskich publikacji: w tym 2 artykuły w *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 3 artykuły w *Energies* oraz 2 w *Przeglądzie Elektrotechnicznym*. Rozprawa stanowi, więc podsumowanie i rozszerzenie wieloletniej działalności w określonej dziedzinie.

Za oryginalne rozwiązanie problemu i osiągnięcia Autora uważam:

- Opracowanie i walidację układu aktywnej kompensacji równoległej, realizowanej przez zasilacz sieciowy prądu stałego wspomagany przestrajalnym filtrem indukcyjnym.
- Oprogramowanie i badania prototypowe na stanowisku laboratoryjnym podukładów identyfikacji parametrów i synchronizacji sygnału referencyjnego z napięciem sieci, układu regulacji napięcia na szynie prądu stałego, układu regulacji prądu w punkcie wspólnego przyłączenia oraz bloku sterowania filtrem przestrajalnym.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa, niezależnie od uwag podanych w punktach 3 i 4 niniejszej recenzji, stanowi oryginalne rozwiązanie przez Autora zagadnienia naukowego. Do rozwiązania tego problemu Autor posłużył się właściwą metodą naukową. Otrzymane wyniki wykazują bardzo dobrą znajomość tematu rozprawy w dyscyplinie naukowej: elektrotechnika, dowodzą także umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na tej podstawie stwierdzam, że przedstawiona rozprawa mgr inż. Łukasza Cieplińskiego spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 (Dz.U. z 2017 r. poz.1789), oraz zgodnie z Ustawą, z dnia 03.07.2018 Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późniejszymi zm.). W związku z powyższym wnoszę o jej dopuszczenie do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

