

Kraków, 08.03.2017

Mgr inż. Miłosz Szarek

Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie

**Szanowny Pan**  
**prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka**

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie**  
**Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej**  
**Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii**

## **Odpowiedź na recenzję rozprawy doktorskiej**

Szanowny Panie Profesorze, bardzo dziękuję za wnikliwą ocenę merytoryczną i redakcyjną mojej pracy doktorskiej, pozytywne opinie, jak również zawarte uwagi krytyczne. Stanowią one istotne wskazówki, służące poprawie jakości realizowanych przeze mnie przyszłych prac badawczych. Poniżej zamieściłem odpowiedzi na postawione przez Pana pytania oraz odniosłem się do uwag zamieszczonych w recenzji.

### **1. Uwagi dyskusyjne i pytania**

- a) *W pracy brak jednego bardzo ważnego aspektu rozważanego układu - odporności na zaburzenia pochodzące z sieci zasilającej. Autor przyjął idealny napięciowy model sieci z zerową impedancją wewnętrzną, co jest uproszczeniem rzeczywistości technicznej. Brak tych rozważań jest zrozumiałą uwzględniając obszerność pracy, ale już w części dotyczącej dalszych badań sugeruję włączenie tej problematyki. W związku z tym prosba o przedstawienie podczas obrony wpływu na zaproponowany układ takich zaburzeń jak asymetria i wahania napięcia, zapady, wzrosty napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu, zmiany fazy, częstotliwości. Czy te zaburzenia będą wymagać modyfikacji sterowania?*

**Odpowiedź:** Zgadzam się z sugestią Pana Profesora. Uwzględnienie w dalszych badaniach wpływu zaburzeń napięć trójfazowej linii zasilającej na pracę systemu przekształcania energii elektrycznej jest bardzo istotnym i ciekawym zagadnieniem. Wymienione przez Pana Profesora zaburzenia stanowią duże wyzwanie zarówno dla samego układu regulacji napięć oraz prądów przekształtnika energoelektronicznego jak i stosowanego w nim algorytmu pętli synchronizacji fazowej (PLL). Zadaniem falownika, pomimo występującej np. asymetrii napięć linii zasilającej powinna być generacja symetrycznych prądów fazowych. Zaimplementowany w pracy doktorskiej układ sterowania, bazujący na składowych ortogonalnych  $dq$  synchronicznego układu odniesienia prądów i napięć, zakłada symetrię układu trójfazowego. Wystąpienie

asymetrii napięć linii zasilającej spowoduje pojawienie się składowej o podwójnej częstotliwości (100 [Hz]) w przebiegach składowych  $dq$  napięć mierzonych, co uniemożliwi poprawne działanie układu synchronizacji SRF-PLL, wpływając niekorzystnie na układ regulacji samych prądów fazowych. Zatem, dla takich przypadków konieczna jest modyfikacja algorytmu sterowania, polegająca np. na uniewrażliwieniu go na występowanie dodatkowych składowych poprzez wprowadzenie filtracji przetwarzanych sygnałów napięciowych. Dodatkowo można rozważyć zastosowanie aparatu matematyczno-obliczeniowego w postaci np. wykorzystania metody składowych symetrycznych w procesie identyfikacji zaburzenia sieciowego i ew. modyfikacji składowych referencyjnych realizowanych napięć falownika.

- b) *Kilkakrotnie w pracy podkreślono redukcję pochodnej napięcia wyjściowego przekształtnika  $du/dt$  uzyskiwaną jako efekt stosowania przekształtników wielopoziomowych: „Charakteryzują się one również zmniejszoną wartością pochodnej napięcia wyjściowego ( $du_{abc}/dt$ ), redukując tym samym jego współczynnik THD, a zatem udział harmonicznych niskiego rzędu.” (str. 55, pierwszy akapit). W sensie jakościowym to stwierdzenie nie budzi wątpliwości. Jaki jest wymiar liczbowy (redukcja THD)?*

**Odpowiedź:** Przytoczony przez Pana Profesora fragment pracy doktorskiej dotyczy charakterystyki metody sterowania falownikiem wielopoziomowym, polegającej na wyborze dyskretnego wektora napięcia (NVC - Nearest Vector Control), którego koniec znajduje się najbliżej wyznaczonego wektora referencyjnego. W zamieszczonej w bibliografii publikacji [1], opisującej wspomnianą metodę sterowania, autorzy przedstawili wyniki działania 11-poziomowego kaskadowego falownika napięcia. Uzyskana wartość THD napięcia fazowego falownika ( $u_{an}$ ) wynosi około 11 [%], dla amplitudowego indeksu modulacji  $m_a = 0.95$ . Dla porównania, obliczone w rozprawie doktorskiej THD napięcia fazowego falownika 3-poziomowego, sterowanego za pomocą wektorowej metody modulacji ( $f_{sw} = 16[\text{kHz}]$ ,  $m_a = 0.95$ ) jest równe 48.4 [%] (str. 87).

- c) *Dodatek A zawiera treści oczywiste, książkowe. Praca jest adresowana do czytelnika o pewnym poziomie wiedzy z dziedziny będącej przedmiotem pracy.*

**Odpowiedź:** Zawarty w Dodatku A opis aparatu matematycznego przekształceń układów trójfazowych mógłby zostać skrócony, lub ew. częściowo pominięty. Zamieszczenie tych informacji właśnie w dodatku miało w zamyśle autora stanowić uzupełnienie wiedzy potencjalnego czytelnika pracy doktorskiej, jak również jednoznacznie pokazać oznaczenia oraz zależności pomiędzy przedstawionymi składowymi danymi wektorów ( $abc/\alpha\beta/dq$ ).

- d) *W rozważaniach dotyczących analizy widmowej prądu wyjściowego falownika Autor stosuje współczynnik odkształcenia THD wyliczany na podstawie wartości harmonicznych (w jakim paśmie częstotliwości?). Równocześnie na zaprezentowanych charakterystykach widać rozmycie widma. Właściwszym byłoby więc zastosowanie definicji współczynnika THD opartej na wartości skutecznej i wartości podstawowej harmonicznej.*

**Odpowiedź:** Zawarte w pracy doktorskiej THD prądu wyjściowego falownika, wyznaczone zostało dla zakresu 50 harmonicznych ( $f_{max} = 2.5 [\text{kHz}]$ ). Analizie częstotliwościowej (FFT) poddano przebieg prądu o długości 10 okresów (200 [ms]), zarejestrowany przy użyciu okna prostokątnego. Zgadzam się z uwagą Pana Profesora, że lepszym rozwiązaniem w przypadku widocznego rozmycia widma, byłoby zastosowanie definicji współczynnika THD opartej na wartości skutecznej i wartości podstawowej harmonicznej.

e) *Brak spisu oznaczeń i symboli.*

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora. Zamieszczenie spisu oznaczeń i symboli byłoby użytecznym dodatkiem.

## 2. ZAŁĄCZNIK: Uwagi szczegółowe

W pełni zgadzam się z większością uwag merytorycznych, edytorskich oraz propozycjami zmian zamieszczonymi przez Pana Profesora w rozdziale p.t. "ZAŁĄCZNIK: Uwagi szczegółowe" recenzji rozprawy doktorskiej. Do najważniejszych z nich (w mojej ocenie) odniosłem się w poniższych podpunktach:

a) *Str. 20, Symbolem E oznaczono zarówno „poziom rzeczywistego nasłonecznienia” jak i „energię na jednostkę powierzchni”*

**Odpowiedź:** W pracy doktorskiej przez pojęcie "nasłonecznienie" wyrażona jest całkowita ilość energii słonecznej padającej na jednostkę powierzchni, stąd jednakowe oznaczenie (*E*).

b) *Str. 22, Ceny w dolarach/W - nie podano źródła tych informacji cenowych.*

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora. Podczas pozyskiwania informacji o aktualnych cenach poszczególnych technologii modułów PV korzystano z branżowych portali informacyjnych takich jak: [www.pv-magazine.com](http://www.pv-magazine.com) lub [www.nrel.gov/pv](http://www.nrel.gov/pv).

c) *Str. 30, Algorytm poszukiwania punktu mocy maksymalnej bazujący na metodzie konduktancji inkrementalnej - autor nie przytacza bardzo bogatej literatury dotyczącej tego algorytmu.*

**Odpowiedź:** Rzeczywiście, w pracy doktorskiej nie jest bezpośrednio podany odnośnik do literatury dotyczącej algorytmu IC-MPPT. Jednak, na początku str. 30 dokonując ogólnej charakterystyki metod MPPT, podany został zbiór pozycji literaturowych "[46, 52, 84, 127, 135, 138]", które zawierają również szczegółowy opis algorytmu bazującego na znaku konduktancji inkrementalnej.

d) *Str.38 i 39, rys. 3.4 i 3.5 kierunki prądu  $i_k$  na obydwu rysunkach powinny być różne*

**Odpowiedź:** Moim zdaniem zamieszczone oznaczenia kierunków prądów są poprawne. W pracy doktorskiej przyjęto, że strzałki na wszystkich schematach sygnalizują dodatni kierunek danego prądu. Rysunek 3.5 (str. 39) w przeciwieństwie do rys. 3.4 (str. 38) przedstawia przepływ ujemnej wartości prądu ( $i_k < 0$ ) w pojedynczej gałęzi falownika NPC w zależności od stanu łączników półprzewodnikowych. Zatem zgodnie z sygnalizacją strzałki wpływa on do wyjścia gałęzi fazowej falownika.

e) *Str. 43, wzór (3.9), brak objaśnienia symbolu  $T_{sw}$*

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora.  $T_{sw}$  oznacza okres impulsowania modulatora PWM.

- f) Str. 44, rozdział 3.4, pierwszy akapit „... które scharakteryzowano w dodatku 4.”

**Odpowiedź:** Rzeczywiście, w rozdziale 3.4 zamieszczono błędny odnośnik do Dodatku A.

- g) Str. 59, rozdział 4.2.2., akapit poniżej zależności 4.1; „Innymi słowy, koniec wektora referencyjnego powinien znajdować się wewnątrz lub na okręgu o promieniu równym  $3/3u_{dc}$ , zaznaczonym linią przerywaną na rysunku 3.10 oraz 4.3.” Okręgu nie ma na rys. 3.10.

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora. Na rysunku 3.10 nie zamieszczono okręgu o promieniu  $\sqrt{3}/3u_{dc}$ .

- h) Str. 69, Tabela 4.1 i Tabele 4.2 i 4.3, dlaczego przedziały czasowe  $t_I - t_{III}$  raz są pisane małą, a raz dużą literą?

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora. W tabelach 4.2 i 4.3 oznaczenia czasów załączenia poszczególnych wektorów powinny być pisane małą literą ( $t_I - t_{III}$ ).

- i) Str. 87, pierwszy akapit, „Harmoniczna ta nie występuje w napięciu międzyfazowym, a jedynie jej wartości pochodne ( $U_{ab} 160\pm 1, U_{ab} 160\pm 2, \dots$ ).

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora. W opisie użyto niefortunnego zwrotu. Chciałem zwrócić uwagę na występowanie harmonicznej rzędu 160 w napięciu fazowym falownika ( $u_{aM}$ ), jednocześnie podkreślając jej brak w napięciu międzyfazowym ( $u_{ab}$ ) i pojawienie się harmonicznych rzędów sąsiednich -  $160\pm 1, 160\pm 2$ .

- j) Rys. 4.20, przebiegi prądu w poszczególnych półokresach są różne, co jest tego przyczyną?

**Odpowiedź:** Różnice w symetrii uśrednionych przebiegów pulsów prądu węzła środkowego dzielnika kondensatorowego ( $i_{M\text{ avg } T_{cSVM}}$ ), mogą wynikać z założonej dyskretyzacji oraz kwantyzacji wartości sygnałów napięć referencyjnych, zastosowanych w modulatorze SVM. Jednak pomimo zauważalnej asymetrii, wartość średnia przebiegu prądu za 1/3 okresu podstawowej harmonicznej ( $T_1 = 20$  [ms]) jest równa zero.

- k) Str. 88, ostatni akapit, „W wyznaczonym widmie częstotliwościowym napięć wyjściowych falownika (rysunek 4.17) można zauważyć wiele wyróżniających się harmonicznych parzystych jak i nieparzystych.” Trudno coś takiego zauważyć.

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora. Niektóre fragmenty analizy częstotliwościowej powinny być powiększone dla lepszej przejrzystości.

- l) Str. 91, pierwszy akapit - „... dynamicznych źródeł napięciowych (schemat 4.5).”  
Ostatni akapit - „... decyduje o stabilności kondensatora jako źródła napięcia

**Odpowiedź:** Zastosowano nieprecyzyjne sformułowania. Poprzez określenie "źródła dynamiczne" miałem na myśli kondensatory jako źródła napięcia o zmiennej wartości, zależnej od zgromadzonej w nich energii oraz chwilowego poziomu prądu obciążenia ("stabilność kondensatora").

- m) *Str. 102, nad tytułem rozdziału 5.3, także winnych miejscach w tekście - czy można „generować prąd”?*

**Odpowiedź:** Zgadzam się z pytaniem retorycznym Pana Profesora. W odniesieniu do źródeł PV lepszym określeniem byłoby np. "prąd obciążenia".

- n) *Str. 126, równanie 6.1 jest słuszne przy założeniu idealnego źródła napięcia AC. W rzeczywistości, przy mocy falowników rozważanych w pracy (średnie i duże moce) zmiana tego napięcia może mieć wpływ na pracę przekształtnika. Jaki wpływ?*

**Odpowiedź:** Zgadzam się z uwagą Pana Profesora. W równaniu nie uwzględniono impedancji źródeł napięcia linii zasilającej, która będzie powodować dodatkowe spadki napięć w wyniku przepływu dużych wartości prądów fazowych. Wpływ takiej sytuacji na pracę przekształtnika najprawdopodobniej będzie zależał od aktualnej (referencyjnej) wartości współczynnika mocy i wartości (L, R) impedancji linii. Może np. powodować przepływ dodatkowej mocy biernej.

- o) *Str. 134, akapit pod zależnością (6.24). „Poprzez analizę znaku oraz wartości składowej d wektora napięcia mierzonego ( $u_{gd}$ ) wprowadza ona dodatkowy uchyb regulacji ( $u_{gq}$ ) wymuszając tym samym prawidłowe działanie algorytmu PLL”. O jaki „dodatkowy uchyb regulacji” tu chodzi?*

**Odpowiedź:** Wykrycie ujemnej wartości składowej d napięcia sieci ( $u_{gd}$ ) oznacza, że wartość kąta niezsynchronizowania przekroczyła  $\pi/2$  i grozi zatrzaśnięcie się algorytmu PLL w przeciwfazie. Wówczas zaimplementowana funkcja zabezpieczenia przeciwfazowego forsuje uchyb regulacji ( $e_{ugq}$ ) poprzez dodanie ustalonej stałej wartości ( $u_{gq}^*$ ) o odpowiednim znaku. W rezultacie wymuszony jest powrót do stanu synchronizmu.

- p) *Str. 179, akapit pod zależnością (A.11), „...Dodatkowo, przekształcenie to zachowuje zgodność chwilowych wartości przebiegów przed i po transformacji,...)???*

**Odpowiedź:** W opisie transformacji Clarke'a użyte sformułowanie "zgodność chwilowych wartości przebiegów", oznacza równość wartości chwilowych napięcia fazy  $a$  ( $u_a$ ) przed transformacją oraz napięcia składowej  $\alpha$  ( $u_\alpha$ ) po transformacji. Napięcia te posiadają taką samą amplitudę oraz kąt fazowy.

### 3. Bibliografia

- [1] Rodriguez J., Moran L., Correa P., Silva C., *A vector control technique for medium-voltage multilevel inverters*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 49(4), 882 – 888, 2002, ISSN 0278-0046

Pozdrawiam i łączę wyrazy szacunku,  
Miłosz Szarek.