

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.102.0001

Dominik ŁUCZAK*, Krzysztof SIEMBAB*, Stefan BROCK*

STEROWANIE TOLERUJĄCE USZKODZENIA PRZEKSZTAŁTNIKA DLA NAPĘDU Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM O MAGNESACH TRWAŁYCH

Artykuł przedstawia algorytm sterowania tolerującego uszkodzenia dla trójfazowego przekształtnika energoelektronicznego zasilającego silnik synchroniczny o magnesach trwałych. Zaprezentowano rekonfigurację topologii przekształtnika po wykryciu uszkodzenia w jednej z gałęzi oraz zaproponowany został zmodyfikowany algorytm modulacji wektora przestrzennego. Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdzają, że zaproponowany napęd zasilany przez przekształtnik z 4 nieuszkodzonymi kluczami pracuje stabilnie z dobrymi właściwościami dynamicznymi i statycznymi.

SŁOWA KLUCZOWE: sterowanie tolerujące uszkodzenia, modulacja wektora przestrzennego, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienie sterowania tolerującego uszkodzenia jest aktualnym tematem wielu prac badawczych, podejmowanych przez liczne zespoły naukowe na całym świecie. Przegląd prac z tego zakresu przedstawiony jest w pracach [7, 12]. Istotne znaczenie wykorzystania metod sterowania tolerującego uszkodzenia w zakresie napędu elektrycznego jest tematem przeglądowej pracy [3]. Należy także zauważyć istotne prace z zakresu teorii sterowania tolerującego uszkodzenia opracowane w Polsce [8, 9].

Zaproponowana w pracach [1, 12] klasyfikacja układów sterowania tolerujących uszkodzenia dzieli je na dwa typy: układy z tolerancją pasywną i z tolerancją aktywną. W przypadku układów pasywnie tolerujących uszkodzenia projektuje się algorytm sterowania zgodnie z zasadami sterowania odpornego na wybraną klasę uszkodzeń i zmiany parametrów obiektu. Gdy wystąpi uszkodzenie zawarte w przyjętej klasie, system sterowania powinien zapewnić stabilne działanie układu z akceptowalnym obniżeniem jakości parametrów pracy. Systemy sterowania pasywnie tolerujące uszkodzenia nie wymagają detekcji i identyfikacji uszkodzenia, nie podlegają także rekonfiguracji lub adaptacji. Dla układów sterowania aktywnie tolerującego awarie wymagana jest detekcja i identyfikacja

* Politechnika Poznańska

uszkodzeń. Na tej podstawie prowadzona jest taka rekonfiguracja lub adaptacja systemu sterowania by uzyskać możliwie dobre właściwości układu regulacji.

Zagadnienie detekcji uszkodzeń w maszynach elektrycznych jest szeroko opisywane w literaturze [2], jednak zdecydowana większość publikowanych prac dotyczy wczesnej diagnostyki wybranych klas awarii maszyn elektrycznych. Taka diagnostyka służy zapobiegania poważnym awariom, natomiast nie znajduje zastosowania w układach sterowania tolerującego awarie. Warto zauważyć istotne badania z tego zakresu prowadzone w kraju i przedstawione między innymi w pracach [6, 10].

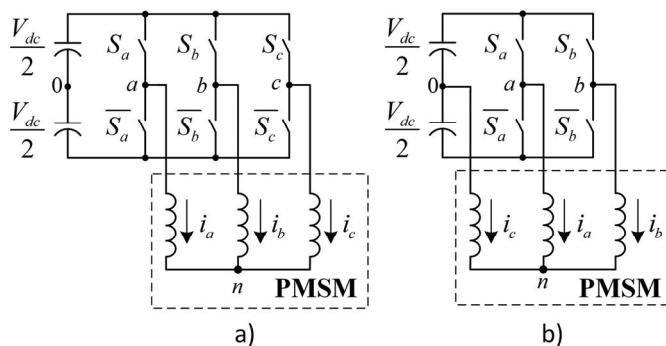
W literaturze tematu opisywanych jest kilka rozwiązań struktur przekształtników tolerujących uszkodzenia. Przegląd struktur odpornych na uszkodzenia przekształtników przedstawiono w pracach [4, 14]. Spotykane rozwiązania odpornych na uszkodzenia napędów można podzielić na dwie kategorie: rozwiązania w pełni redundantne gdzie uszkodzony przekształtnik zostaje zastąpiony przez sprawny (stosowane w instalacjach odpowiedzialnych za zdrowie i życie ludzkie takich jak napędy w lotnictwie, górnictwie, energetyce atomowej) oraz rozwiązania z odpowiednio zmodyfikowaną topologią przekształtnika. Modyfikacja topologii polega na wykorzystaniu redundantnej gałęzi mostka tranzystorowego, co wymaga znacznej rozbudowy standardowej topologii, lub na ominięciu uszkodzonej gałęzi przekształtnika lub fazy silnika przez podłączenie jej do punktu zerowego napięcia zasilającego. Wymaga to niewielkiej ingerencji w standardową topologię przekształtnika, ale pociąga za sobą konieczność modyfikacji algorytmów sterowania oraz zwiększa obciążenie pozostałych, wciąż działających torów energetycznych.

Zdecydowana większość dostępnych prac z zakresu sterowania tolerującego uszkodzenia dla napędów elektrycznych dotyczy silników indukcyjnych. Jest to uzasadnione dominacją silników indukcyjnych w większości zastosowań. Maszyny o wzbudzeniu magnetoelektrycznym, zwłaszcza maszyny synchroniczne o magnesach trwałych PMSM, znajdują zastosowanie przede wszystkim w tych napędach, w których kluczowe znaczenie mają bardzo dobre właściwości dynamiczne. Niewiele jest jednak publikacji dotyczących sterowania tolerującego uszkodzenia dla takich maszyn [5].

W artykule przedstawiono badania układu sterowania tolerującego uszkodzenia dla napędu PMSM. Przekształtnik energoelektroniczny ma zmodyfikowaną, tolerującą uszkodzenia strukturę i może być skonfigurowany zarówno jako standardowy 3-fazowy falownik (6S3P), oraz jako 3-fazowy (4S3P) lub 2-fazowy (4S2P) o zmniejszonej do 4 liczbie kluczy energoelektronicznych. Zaproponowano zmodyfikowane algorytmy generowania sygnałów PWM sterujących falownikiem. Przedstawiony układ został przetestowany zarówno symulacyjnie, jak i w trakcie badań laboratoryjnych.

2. MODEL MATEMATYCZNY PRZEKSZTAŁNIKA

Standardowy tranzystorowy falownik napięcia 3-fazowy nie umożliwia wprowadzenia sterowania tolerującego uszkodzenia. Na rysunku 1a przedstawiona została rozszerzona struktura, z dodatkową gałęzią zbudowana z dwóch kondensatorów. W ten sposób utworzony jest punkt środkowy, o potencjale równym połowie napięcia zasilania. Po wystąpieniu uszkodzenia w gałęzi przekształtnika należy przekształcić strukturę przekształtnika tak, by uniknąć dalszych uszkodzeń. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia przełączenie uzwojenia silnika pomiędzy uszkodzoną gałęzią przekształtnika a punktem środkowym, co zilustrowano dla przykładu fazy C na rysunku 1b. Tak przekształcona topologia opisywana jest jako 4S3P [11]. W tym układzie sterowanie realizowane jest za pomocą pozostałych 4 tranzystorów.



Rys. 1. Struktura przekształtnika tolerującego uszkodzenia: a) podstawowa topologia 6S3P, b) topologia 4S3P z uszkodzoną gałęzią przekształtnika

Podczas normalnej pracy przekształtnika, wektor napięcia wyjściowego \overline{V}_s jest określony równaniem (1):

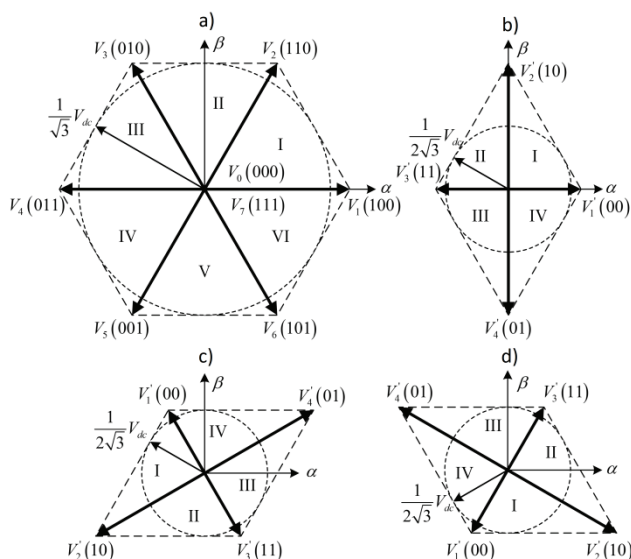
$$\overline{V}_s(V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) = \frac{2}{3}(V_{an} + \alpha V_{bn} + \alpha^2 V_{cn}) = \frac{2}{3}V_{dc}(S_a + \alpha S_b + \alpha^2 S_c) \quad (1)$$

gdzie V_{an}, V_{bn}, V_{cn} to chwilowe napięcie wyjściowe faz silnika w stosunku do punktu neutralnego n , S_a, S_b, S_c to skrótowo opisany stan kluczy w poszczególnych gałęziach przekształtnika $S = \{0, 1\}$, odpowiednio opisujący załączenie dolnego lub górnego klucza w gałęzi, V_{dc} odpowiada napięciu zasilania falownika, natomiast $\alpha = e^{j2\pi/3}$ oznacza operator obrotu.

Po uszkodzeniu jednej z gałęzi przekształtnika skojarzona z nią faza przełączana jest do punktu środkowego gałęzi kondensatorów, jak pokazano na rysunku 1b (dla przykładu uszkodzonej fazy C). Po rekonfiguracji przekształtnika wektor napięcia wyjściowego opisany jest równaniem (2)

$$\vec{V}_s = \begin{cases} \frac{2}{3}V_{dc} (0,5 + \alpha S_b + \alpha^2 S_c) & \text{dla uszkodzonej fazy A} \\ \frac{2}{3}V_{dc} (S_a + 0,5\alpha + \alpha^2 S_c) & \text{dla uszkodzonej fazy B.} \\ \frac{2}{3}V_{dc} (S_a + \alpha S_b + 0,5\alpha^2) & \text{dla uszkodzonej fazy C} \end{cases} \quad (2)$$

Na rysunku 2 przedstawiono położenie wektorów przestrzennych dla przypadku falownika sprawnego, pracującego w topologii 6S3P (a) oraz dla przypadku uszkodzenia jednej z gałęzi, po rekonfiguracji do topologii 4S3P (b, c, d).



Rys. 2. Wektor przestrzenny napięcia wyjściowego falownika: a) falownik sprawny w topologii 6S3P, b) falownik z uszkodzoną gałęzią fazy A, topologia 4S3P, c) falownik z uszkodzoną gałęzią fazy B, topologia 4S3P d) falownik z uszkodzoną gałęzią fazy C, topologia 4S3P

3. ZMODYFIKOWANY ALGORYTM MODULACJI PRZESTRZENNEJ

3.1. Modulacja standardowa przekształtnika w topologii 6S3P

Do sterowania kluczami przekształtnika wykorzystuje się sygnały generowane w bloku modulatora. W ten sposób napięcie wyjściowe falownika odtwarza sygnał napięcia zadanego. W przypadku napędów elektrycznych sterowanych wektorowo często stosowaną metodą jest modulacja wektora przestrzennego (SVM). Polega ona na wyznaczaniu czasów załączeń wektorów wyjściowych napięcia, w trakcie jednego okresu modulacji, zgodnie z równaniem (3):

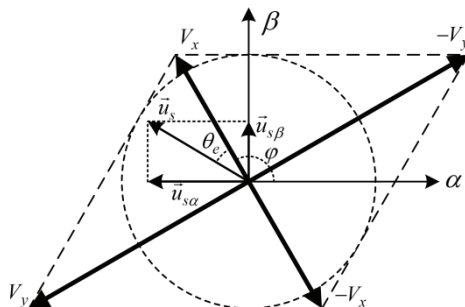
$$\vec{u}_s = d_x \vec{V}_x + d_y \vec{V}_y + (1 - d_x - d_y) \vec{V}_z \quad (3)$$

gdzie \vec{u}_s to zadany wektor napięcia wyjściowego, \vec{V}_x, \vec{V}_y to sąsiednie wektory wyjściowe napięcie falownika (rys. 2a), między którymi leży zadany wektor napięcia wyjściowego, a \vec{V}_z to wektor zerowy, odpowiadający załączeniu wszystkich górnych lub dolnych kluczy falownika. Wartości współczynników d_x, d_y wyznaczających względny czas załączenia odpowiednich wektorów, wyliczane są w bloku modulatora na podstawie odpowiednich zależności trygonometrycznych [14].

3.2. Modulacja dla przekształtnika w topologii 4S3P

Po wykryciu uszkodzenia gałęzi i rekonfiguracji przekształtnika konieczna jest także modyfikacja algorytmu modulatora przestrzennego. Zadane napięcie wyjściowe musi zostać odtworzone przez sumowanie dostępnych aktywnych wektorów napięcia, zgodnie z rysunkami 2b, 2c, 2d. Zmniejszeniu ulega przy tym dostępna długość wektora napięcia wyjściowego – od 0,577 napięcia w obwodzie pośredniczącym dla falownika 6S3P do 0,289 napięcia w obwodzie pośredniczącym dla falownika 4S3P. Należy przy tym uwzględnić odpowiednio różniące się konfiguracje dostępnych wektorów napięcia wyjściowego, zależnie od tego, która gałąź falownika została uszkodzona [14].

Na rysunku 3 przedstawiono układ dostępnych wektorów w przypadku uszkodzenia gałęzi B falownika. Po rekonfiguracji dostępne są wektory $\pm \vec{V}_y$ odpowiadające załączeniu pary kluczy (01) i (10), oraz $\pm \vec{V}_x$ odpowiadający odpowiednio załączeniu par (00) i (11). Nie ma natomiast wektora zerowego, dostępnego w przypadku przekształtnika o topologii 6S3P. Zaproponowano zatem sekwencję załączeń wektorów napięcia: $\vec{V}_x, \vec{V}_y, -\vec{V}_x$ trwających odpowiednio przez czas względny: $d_x + d_z/2, d_y, d_z/2$ (4):



Rys. 3. Modulacja wektora przestrzennego po przyłączeniu fazy B do punktu środkowego, dla falownika w topologii 4S3P

$$\begin{cases} d_x = A(|u_{\alpha n}| \cos \varphi + |u_{\beta n}| \sin \varphi) \\ d_y = B \left(\frac{|u_{\beta n}| \cos \varphi - |u_{\alpha n}| \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right), \\ d_z = 1 - d_x - d_y \end{cases}, \quad (4)$$

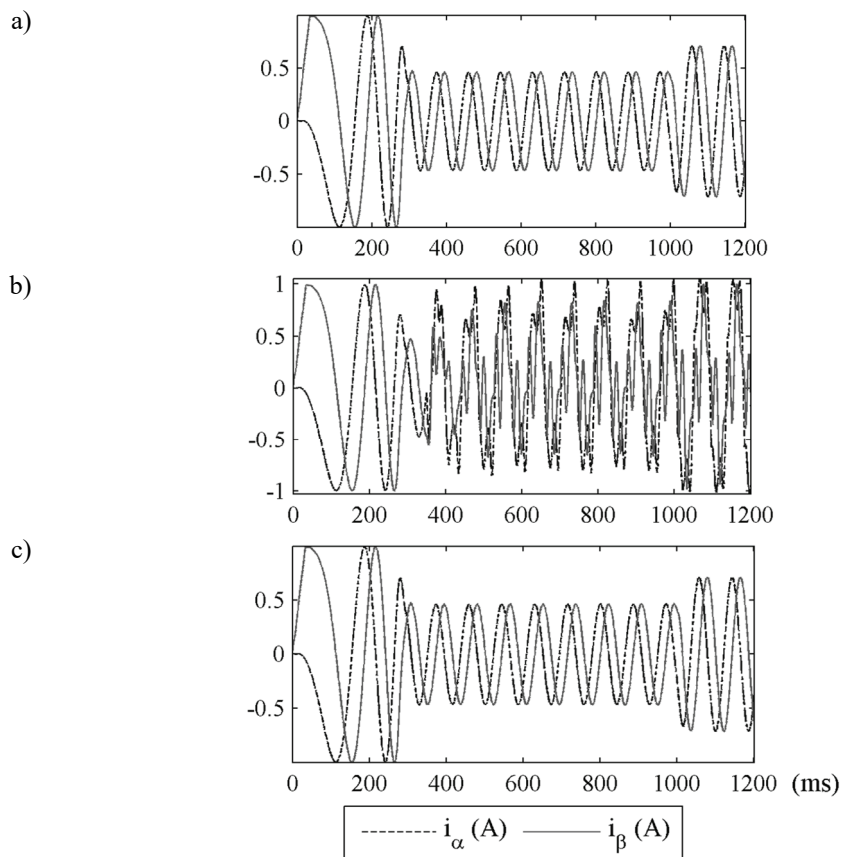
gdzie składowe wektora zadanego $u_{\alpha n}, u_{\beta n}$ zostały znormalizowane, a kąt φ zaznaczony jest na rys. 3. Współczynniki $A, B \in \{-1, 1\}$, wybierane są zależnie od położenia wektora napięcia zadanego. Podobne wzory można uzyskać dla sytuacji uszkodzenia pozostałych gałęzi przekształtnika.

4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

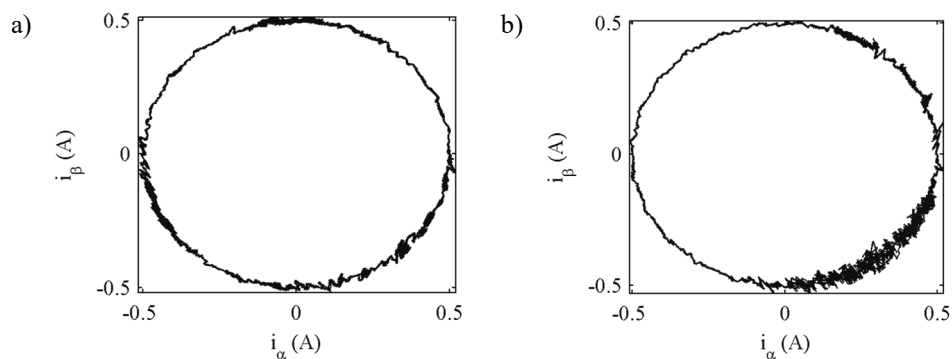
Dla zweryfikowania zaproponowanego algorytmu modulacji przeprowadzono szereg badań symulacyjnych, a następnie zaimplementowano algorytm w układzie sterowania w stanowisku laboratoryjnym. Rysunek 4 przedstawia przebieg składowych prądu w trakcie pracy napędu PMSM ze sterowaniem wektorowym. Eksperyment obejmował rozruch, pracę na biegu jałowym i skokową zmianę obciążenia. Rysunek 4a przedstawia sytuację normalną dla topologii 6S3P. Na kolejnym rysunku 4b przedstawiono test, w trakcie którego uszkodzeniu ulega jedna z gałęzi, lecz układ pracuje bez zmiany struktury i algorytmu sterowania. Widoczne są istotne zniekształcenia prądu, skutkujące nieprawidłową pracą napędu. Rysunek 4c przedstawia wyniki eksperymentu, w którym po uszkodzeniu gałęzi falownika nastąpiła rekonfiguracja i zmiana algorytmu modulacji. W tym przypadku wartości zadane prądu są poprawnie odtwarzane.

Na rysunku 5 przedstawiono hodografy wektora prądu, zarejestrowane w stanie ustalonym. Dla stanu bez uszkodzenia hodograf jest zbliżony do okręgu (rys. 5a), ze stosunkowo niewielkim udziałem odchyłek. Po wykryciu uszkodzenia i rekonfiguracji wyraźnie wzrastają pulsacje prądu, lecz trajektoria wektora prądu pozostaje zbliżona do okręgu. Wzrost amplitudy pulsacji wynika z tego, że wektor napięcia składany jest tylko z wektorów niezerowych, które powodują szybkie zmiany prądu. Efektem dla układu napędowego jest zwiększenie strat w napędzie, co wymusza zmniejszenie przyjętych wartości ograniczeń prądu i momentu silnika.

Przedstawiona metoda rekonfiguracji przekształtnika i zmodyfikowany algorytm modulacji umożliwiają syntezę układu sterowania tolerującego uszkodzenia.



Rys. 4. Przebieg składowych prądu w trakcie testu: a) dla przekształtnika nieuszkodzonego w topologii 6S3P, b) dla przekształtnika z uszkodzona gałęzią, bez rekonfiguracji, c) dla przekształtnika z uszkodzona gałęzią, po rekonfiguracji do topologii 4S3P



Rys. 5. Hodograf wektora prądu w trakcie pracy w stanie ustalonym: a) dla przekształtnika nieuszkodzonego w topologii 6S3P, b) dla przekształtnika z uszkodzona gałęzią, po rekonfiguracji do topologii 4S3P

LITERATURA

- [1] Alwi H., Edwards Ch. & Tan C.P., 2011. *Fault Detection and Fault-Tolerant Control Using Sliding Modes 1st Edition.*, Springer.
- [2] Bellini A. et al., 2008. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12), pp.4109–4126.
- [3] Campos-Delgado D.U., Espinoza-Trejo D.R. & Palacios E., 2008. Fault-tolerant control in variable speed drives: a survey. *IET Electric Power Applications*, 2(2), p.121.
- [4] Doc C., Vincent L., Guy F., 2007. Inverter topology comparison for remedial solution in transistor faulty case. *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, pp.1–8.
- [5] Gajanayake C.J. et al., 2011. Fault tolerant control method to improve the torque and speed response in PMSM drive with winding faults. In *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on*. pp. 956–961.
- [6] Guzinski J., Abu-Rub H., Toliyat H.A., 2010. Speed sensorless AC drive with inverter output filter and fault detection using load torque signal. *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, pp.3113–3118.
- [7] Hwang I. et al., 2010. A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(3), pp.636–653.
- [8] Korbicz J., Koscielny J.M., eds., 2010. *Modeling, Diagnostics and Process Control: Implementation in the DiaSter System 1st Edition.*, Springer.
- [9] Kowalczyk Z., 2009. *Systemy wykrywające, analizujące i tolerujące usterki*, Pomorskie Wydawnictwo Naukowo-Techniczne PWNT.
- [10] Kowalski C.T. et al., 2010. Analysis of inter-turn fault symptoms for the converter-fed induction motor based on the phase-shift calculation. In *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. pp. 766–771.
- [11] Łuczak D., Siembab K., “Comparison of fault tolerant control algorithm using space vector modulation of PMSM drive”, *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics – Mechatronika 2014, Brno, 2014*, pp. 24–31.
- [12] Patton R.J., 1997. Fault-tolerant control systems: The 1997 situation. In *IFAC symposium on fault detection supervision and safety for technical processes*. pp. 1033–1054.
- [13] Siembab K., Zawirski K. , “Modified space vector modulation for fault tolerant control of PMSM drive”, *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, 2016*, pp. 1064–1071.
- [14] Welchko B.A. et al., 2004. Fault Tolerant Three-Phase AC Motor Drive Topologies: A Comparison of Features, Cost, and Limitations. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(4), pp. 1108–1116.

CONVERTER FAULT-TOLERANT CONTROLS FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE

The article presents a fault-tolerant control algorithm for a three-phase power electronics converter feeding a permanent magnet synchronous motor. It shows reconfiguration of converter topology after detecting a fault in one of the branches and proposes modified algorithm of space vector modulation. Results of simulation and experimental studies confirm that the proposed drive powered by the converter with 4 healthy switches will work stable with good dynamic and static properties.

(Received: 04.12.2019, revised: 16.12.2019)