

WIELOPOZIOMOWE FALOWNIKI NAPIĘCIA

Edward Greczko

**Instytut Informatyki i Elektroniki, Uniwersytet Zielonogórski
65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50**

e-mail: E.Greczko@iie.uz.zgora.pl

STRESZCZENIE

W artykule rozpatrzono zasadę budowy i algorytmy sterowania wielopoziomowymi falownikami napięcia o strukturze z zastosowaniem diod Clumped. Na podstawie charakterystyk regulacyjnych i oceny poprawy jakości energii wyjściowej falowników przeprowadzono analizę porównawczą podstawowych rozwiązań schematycznych badanych falowników.

1. WPROWADZENIE

Obecnie można zauważyć powstanie nielicznych [1-3] publikacji poświęconych modernizacji i rozwojowi jednego z podstawowych kierunków budowy falowników z modulacją amplitudowo-impulsową (MAI), tzw. wielopoziomowych falowników napięcia, kształtujących napięcia schodkowe za pomocą kilku źródeł zasilania izolowanych lub sekcjonowanych. Nieobecność w takich falownikach transformatorów sumujących eliminuje ograniczenia zakresów regulacji częstotliwości napięć wyjściowych na niskich częstotliwościach. Celowym jest ich stosowanie na duże moce wyjściowe i wysokie napięcia. Stosowanie modulacji amplitudowo-impulsowej (MAI) powoduje znaczącą poprawę jakości napięć wyjściowych.

W związku z czym można wyodrębnić trzy podstawowe kierunki rozwiązań obwodów siłowych wielopoziomowych falowników napięcia:

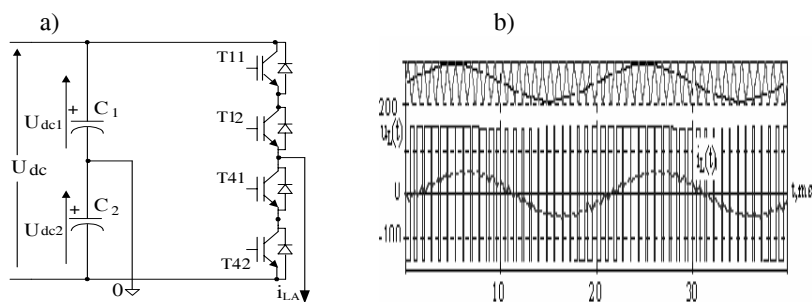
- wielopoziomowe falowniki napięcia z zastosowaniem diod Clumped (ang. **DC**-diod zwierających);
- wielopoziomowe falowniki napięcia z zastosowaniem Capacitor Clumped (ang. **CC** – kondensatorów zwierających);
- wielopoziomowe falowniki napięcia o strukturze Isolated Series H-Bridges (ang. **ISHB** – izolowanych połączonych szeregowo **H**- mostków), lub w skrócie wielopoziomowe kaskadowe falowniki napięcia.

Celem pracy jest rozpatrzenie zasad budowy i algorytmów sterowania wielopoziomowych falowników napięcia o strukturze z zastosowaniem diod Clumped (**DC**), przeprowadzenie analizy porównawczej podstawowych rozwiązań schematycznych danych falowników na

podstawie kryteriów oceny jakości energii wyjściowej oraz określenie zakresów regulacji napięć wyjściowych o zadanej jakości energii wyjściowej.

2. DWUPOZIOMOWY FALOWNIK NAPIĘCIA

W charakterze podstawowego przykładu rozpatrzmy konwencjonalny falownik półmostkowy o sinusoidalnej **MSI** napięcia wyjściowego, schemat przedstawiono na rys.1-a. Na rys.1-b podano sygnały sterujące: trójkątowy modulujący o częstotliwości impulsowania i sinusoidalny modulacyjny oraz napięcie $u_L(t)$ i prąd $i_L(t)$ obciążenia. Zacisk wyjściowy falownika może być za pośrednictwem włączania tranzystorów górnych lub dolnych gałęzi falownika łączony z biegunów dodatnim lub ujemnym źródła zasilania. W wyniku napięcie na obciążeniu jest krzywą o kształcie dwubiegunowym z amplitudą wg bieguna zerowego źródła zasilania równą połowie napięcia zasilania $U_{dc}/2$.



Rys.1. Falownik półmostkowy: a) schemat siłowy; b) przebiegi sygnałów

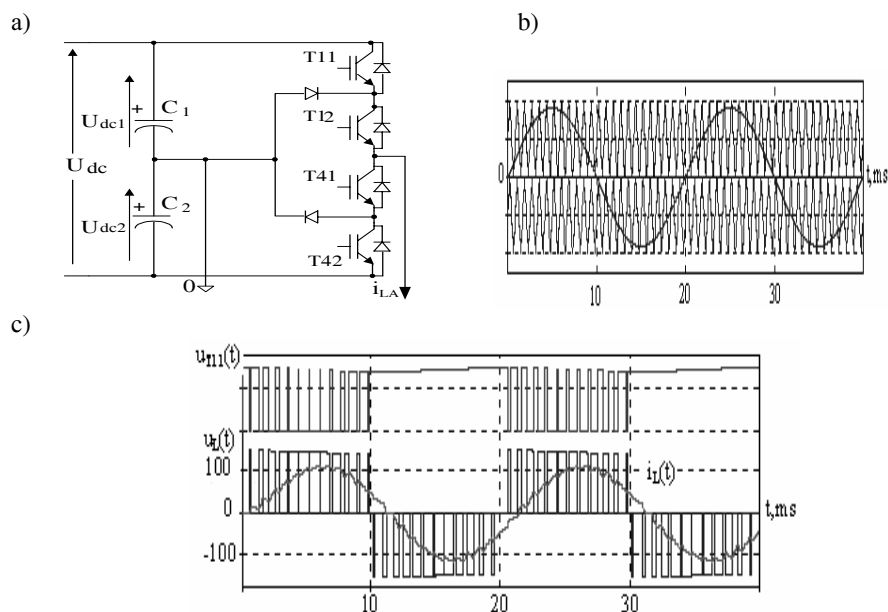
3. WIELOPOZIOMOWE FALOWNIKI NAPIĘCIA Z DIODAMI DC

Rozpatrzenie wielopoziomowych **FN** z diodami **DC** zaczniemy od najprostszego schematu, a mianowicie jednofazowego trójpoziomowego falownika napięcia z diodami **DC**. W charakterze dzielnika napięcia źródła zasilania wykorzystywane jest dwa kondensatory, stwarzające zacisk zerowy źródła napięcia. Schemat siłowy przedstawiono na rys.2-a, który został zbudowany za pomocą czterech tranzystorów mocy, zbocznikowanych diodami zwrotnymi, oraz dwóch diod Clumped **D1**, **D2**, połączonych wspólnym zaciskom z zaciskom zerowym źródła zasilania.

Modulację sinusoidalną dwupoziomową napięcia wyjściowego w tym falowniku realizuje się w wyniku porównania na dwóch komparatorach sinusoidalnego sygnału modulacyjnego o częstotliwości **50Hz** z dwoma sygnałami modulującymi (trój kątowymi, przesuniętymi między sobą poziomo) o częstotliwości impulsowania $f_{imp}=1200\text{Hz}$ (patrz rys. 2b).

Zacisk wyjściowy falownika może być za pośrednictwem włączania lub dwóch tranzystorów górnych **T11**,**T12**, lub dwóch tranzystorów dolnych **T41**,**T42**, lub dwóch tranzystorów

środkowych **T12,T42** połączony lub z zaciskom dodatnim, lub z zaciskom ujemnym, lub z zaciskom zerowym źródła zasilania. W wyniku napięcie $u_L(t)$ na odbiorniku (patrz rys. 2c) jest krzywą o modulacji jednobiegunowej sinusoidalnej (z amplitudą równą $U_{dc}/2$), a prąd odbiornika $i_L(t)$ – quasi sinusoidalnym. Z przebiegu napięcia na tranzystorze $u_{T11}(t)$ można wnioskować, że wartości chwilowe napięć na tranzystorze **T11** zmieniają się w granicach połowy napięcia źródła zasilania $U_{dc}/2$.



Rys. 2. Falownik trójpoziomowy: a) schemat siłowy; b) sygnały sterujące; c) przebiegi napięcia tranzystora $u_{T11}(t)$ oraz napięcia $u_L(t)$ i prądu $i_L(t)$ odbiornika

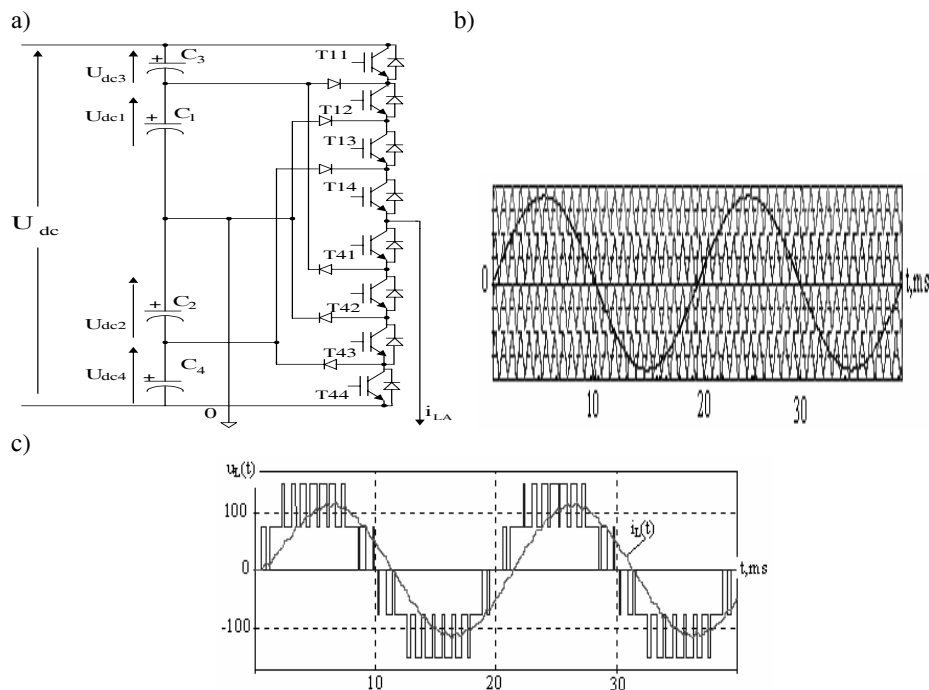
Rozpatrzmy budowę i zasadę pracy 5-poziomowego **FN** jednofazowego z diodami **DC** (rys. 3). W charakterze źródła zasilania wykorzystywane cztery włączonych szeregowo źródła zasilania o równej wartości $U_{dc}/4$, stwarzające wg zaciska zerowego dwa dodatnich i dwa ujemnych pozioma napięć $\pm U_{dc}/4$, $\pm U_{dc}/2$. Gałąź siłowa falownika składa się z ośmiu tranzystorów **T11-T14** i **T21-T24**, zbocznikowanych diodami zwrotnymi, oraz z trzech par diod Clumped (**D1-D2**, **D3- D4**, **D5-D6**).

Modulację sinusoidalną realizuje się w wyniku porównania na czterech komparatorach sinusoidalnego sygnału modulacyjnego o częstotliwości **50Hz** ze czterema sygnałami modulującymi (trój kątowymi, przesuniętymi między sobą poziomo) o częstotliwości impulsowania $f_{imp}=1200\text{Hz}$ (rys. 3b). Każdy z komparatorów steruje dwoma tranzystorami mocy w przeciw fazie (jednym z górnej gałęzi, a drugim z dolnej gałęzi falownika).

W wyniku napięcie $u_L(t)$ na odbiorniku (rys. 3c) jest krzywą o kształcie 5-poziomowym (czyli 2-schodkowym w ciągu każdej półfali napięcia), jak również o modulacji amplitudowo-impulsowej (MAI), a prąd odbiornika $i_L(t)$ – praktycznie sinusoidalnym.

Zwiększając liczbę poziomów w **FN**, tym samym obniżamy napięcia na tranzystorach. Dla porównania w falowniku 3-poziomowym wartości chwilowe napięć na tranzystorach siłowych znajdują się w granicach $U_{dc}/2$, a w falowniku 5-poziomowym – w granicach napięcia $U_{dc}/4$.

Sekcjonowane źródło zasilanie z rys. 3a przedstawiono za pomocą czterech szeregowo włączonych źródeł o jednakowej wartości napięcia zasilania, które można wymienić na jedno źródło napięcia U_{dc} z dzielnikiem napięcia w postaci czterech włączonych szeregowo kondensatorów z poszczególnym napięciem $U_{dc}/4$. Przy tym osobnym ważnym zagadnieniem jest podtrzymanie stabilnym napięcia na kondensatorach. Niestabilność napięć wynika z faktu istnienia niejednakowego czasu ładowania i rozładowania poszczególnych kondensatorów za okres napięcia wyjściowego falownika. Jednak to zagadnienie wybiega poza obszar pracy niniejszego badania wielopoziomowych **FN** z diodami **DC**.



Rys. 3. Falownik 5-poziomowy: a) schemat siłowy; b) sygnały sterujące; c) przebiegi napięcia $u_L(t)$ i prądu $i_L(t)$ odbiornika

W s -poziomowym **FN**, w którym parametr s niech przyjmuje wartości $s = 3, 5, 7, \dots$ oraz zakładając sumaryczną wartość włączonych szeregowo źródeł równą U_{dc} , to wartości poszczególnych poziomów napięcia źródła można opisać wzorem $U_{dc}/(s-1)$. Odpowiednio wartości chwilowe napięć na tranzystorach siłowych w s -poziomowym **FN** będą znajdować się w granicach $U_{dc}/(s-1)$.

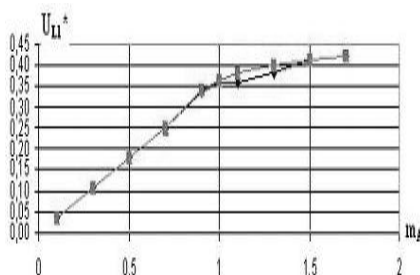
Z przedstawionych na rys. 2b i rys. 3c przebiegów sygnałów sterujących w 3-poziomowym i 5-poziomowym FN można zauważyć, że, regulując amplitudę i częstotliwość sygnału sinusoidalnego, w wyniku osiągamy niezależną regulację wielkości napięcia i częstotliwości wyjściowych tych falowników.

4. ZAKRESY REGULACJI NAPIĘĆ WYJŚCIOWYCH W FALOWNIKACH Z DC

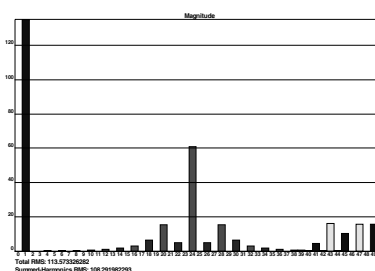
W celu obliczenia wskaźników energetycznych w obwodach wyjściowych 2-ch, 3-ch i 5-o poziomowych falownikach z diodami DC na podstawie pakietu symulacyjnego Tcad6.2 wykonano szereg symulacji w funkcji głębokości modulacji m_A przy następujących parametrach: wartość napięcia zasilania falownika $U_{dc}=300V$, względna częstotliwość impulsowania $f_{mod}^* = 24$, RL-obciążenie (przy $f=50Hz$, $S=1kVA$, $\cos\varphi = 0,996, 0,906, 0,707$). Współczynnik głębokości modulacji m_A określamy jako stosunek amplitudy sygnału sinusoidalnego do amplitudy sumarycznej sygnału trójkątego modulującego.

Zbadano charakterystyki regulacyjne $U_{L1}^* = f(m_A)$ przy $0.1 \leq m_A \leq 1.7$, parametrach odbiornika $\cos\varphi = 0,996, 0,906, 0,707$ – przedstawione na rys. 4a oraz widmo harmoniczne napięcia wyjściowego 3-poziomowego falownika przy $f_{imp}^* = 24$ i $m_A=0.9$ - pokazane na rys. 4b.

a)



b)



Rys. 4. $U_{L1}^* = f(m_A)$ charakterystyki regulacyjne – (a); widmo harmoniczne napięcia wyjściowego(b);

Parametr U_{L1}^* charakterystyki regulacyjne jest definiowany jako stosunek wartości skutecznej amplitudy podstawowej harmonicznego napięcia wyjściowego do napięcia zasilania falownika $U_{L1}^* = U_{L1}/U_{dc}$. Dla rozpatrywanych falowników 2-ch, 3-ch i 5-o poziomowych wspólną cechą jest to, że współczynnik U_{L1}^* przyjmuje podobne wartości dla poszczególnych falowników w zależności od współczynnika głębokości modulacji.

W każdym z rozpatrzonych falowników 2-ch, 3-ch i 5-o poziomowych można zauważyć poprawę widm harmonicznego napięć wyjściowych $u_L(t)$ dzięki tłumieniu harmonicznego wysokoczęstotliwościowego bliskich podstawowej harmonicznego oraz przesunięciu znaczących wg wartości harmonik w.cz. w stronę wysokich częstotliwości do f_{imp} . Poza tym

w falowników z diodami DC zarówno amplituda harmonicznej podstawowej, jak i jej wartość skuteczna zależą od głębokości modulacji m_A .

W charakterze parametru oceny jakości energii wyjściowej badanych falowników, przy opisanu którego uwzględniany są amplitudy harmonicznych składowych oraz ich numery rządowe w widmie harmonicznym, najlepiej nadaje się współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu wyjściowego THD(I_L) falownika.

Dla dogodności przeprowadzenie ocen porównywalnych z innymi rodzajami PWM w FN na podstawie danych symulacji obliczone zakresy regulacji napięć wyjściowych z $THD(I_L) \leq 14.3\%$, które zestawione w postaci tab.1.

Tab. 1. Zakresy regulacji napięć wyjściowych z $THD(I_L) \leq 14.3\%$

cosφ	2-poziom.FN	3-poziom. FN	5-poziom. FN
0.966	12%	44%	72%
0.906	31%	76%	88%
0/707	52%	100%	100%

Z powyższej Tab.1 można zauważyć dość znaczące rozszerzenie zakresów regulacji napięć wyjściowych o podwyższonej jakości energii wyjściowej w porównaniu z 2-poziomowymi FN jak w 3-poziomowych falownikach, oraz jeszcze bardziej znaczące w 5-poziomowych FN c diodami DC.

5. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione dane stwarzają możliwości przeprowadzenia na wstępnym etapie projektowania oceny i wyboru, w zależności od wymaganych zakresów sterowania oraz zadanej jakości energii wyjściowej, falownik o odpowiedniej strukturze i liczbie kształtowanych poziomów napięcia wyjściowego.

Przedstawione podejście dotyczące określenia i oceny zakresów regulacji napięć wyjściowych o zadanej jakości energii wyjściowej można rozszerzyć również na falowniki o innej strukturze oraz innej liczbie poziomów napięć wyjściowych.

LITERATURA

- [1] E.N. Greczko, J.J. Kuleszow: *Optimalnyj sintez inwertorów o amplitudno- impulsnoj modulacij*, Kijów: Nauk.dumka, 220s., 1987
- [2] G. Sinha, T. A. Lipo: *A Four Level Inverter Based Drive With a Passive Front End*, Proc.IEEE-PESC'99 Conf., pp.590-595
- [3] Y. Shakweh, E. A. Lewis: *Assessment Of Medium Voltage PWM VSI Topolodi3es For Multi-Megawatt Variable Speed Drive Applications*, Proc. PESC'99 Conf., pp.965-970