

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **236207**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **424433**

(51) Int.Cl.
H02J 3/38 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **31.01.2018**

(54) **Układ przekształtnika oraz sposób sterowania pracą przekształtnika**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
12.08.2019 BUP 17/19

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
28.12.2020 WUP 21/20

(73) Uprawniony z patentu:
**POLITECHNIKA WARSZAWSKA,
Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:
**KAMIL MOŹDŻYŃSKI, Płochocin, PL
MARIUSZ MALINOWSKI, Radom, PL
SEBASTIAN STYŃSKI, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Marek Bury

PL 236207 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest układ przekształtnika sprzężonego z siecią energetyczną oraz sposób sterowania jego pracą dla eliminacji zaburzeń sieci energetycznej. Przekształtniki takie są wykorzystywane do zapewniania współpracy urządzeń stałoprądowych takich jak akumulatory, czy magazyny energii z siecią energetyczną.

Przekształtniki energoelektroniczne przetwarzające energię elektryczną poprzez pobór lub dostarczanie energii do sieci elektroenergetycznej narażone są na niekorzystne oddziaływanie zaburzeń napięcia sieci, które mają nieprzewidywalny charakter oraz czasy wystąpienia i trwania. Są to w szczególności: zapady, asymetria, odkształcenie wyższymi harmonicznymi, impulsy przepięciowe czy fluktuacje częstotliwości. Zaburzenia te wprowadzają odkształcenia prądu przemiennego przetwarzanego przez sieciowy przekształtnik energoelektroniczny co jest niedopuszczalne według norm jakościowych. Sytuacja ta ma miejsce w przypadku gdy parametry przebiegu napięcia w sieci elektroenergetycznej znajdują się poza wartościami nominalnymi, a metoda regulacji prądu układu przekształtnikowego nie jest w stanie utrzymać zadanej wartości prądu. W przypadku nasilonych zaburzeń napięcia lub zmian impedancji sieci widzianej z punktu przyłączenia sieciowego układu przekształtnikowego, układ regulacji może wykroczyć poza zakres stabilnej pracy i jest zmuszony do odłączenia układu przekształtnikowego od sieci przerywając pobór lub dostarczanie energii elektrycznej.

W literaturze znane są liczne metody regulacji prądów fazowych przetwarzanych przez układy przekształtnikowe sprzężone z siecią elektroenergetyczną, w których efekt kompensacji zaburzeń prądu pod wpływem zaburzeń napięcia został osiągnięty jedynie częściowo. Stosowane układy regulacji prądu dzielą się na następujące typy:

- Regulatory liniowe pracujące w układzie stacjonarnym lub synchronicznie wirującym z wektorem napięcia sieci.
- Regulatory histerezowe.
- Bazujące na sieciach neuronowych.

Najpowszechniej stosowane są regulatory liniowe ze względu na stały okres łączeniowy tranzystorów, co również daje stały czas obliczeniowy. Regulatory liniowe są łatwe w strojeniu oraz implementacji, natomiast mają ograniczone pasmo sterowania do wybranej harmonicznej i bez stosowania dodatkowych układów dekompozycji zaburzeń nie są w stanie zapewnić dokładnej i stabilnej regulacji prądu.

Rozwiązanie opisane w pracy autorstwa Miveh, M. R., Rahmat, M. F., Ghadimi, A. A., & Mustafa, M. W. (2016). pt. „Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1592–1610, polega na transformacji mierzonych sygnałów prądów fazowych do układu wirującego synchronicznie do wektora napięcia sieci, gdzie sygnał prądu przyjmuje stałą wartość i przetwarzany jest przez regulator proporcjonalno całkujący PI. W przypadku gdy występują odkształcenia w regulowanej wartości prądu pojawiają się składowe przemienne. Kompensacja zaburzeń realizowana jest poprzez ekstrakcję zaburzenia i przetwarzaniu w osobnym, układzie wirującym z częstotliwością równą częstotliwości zaburzenia, która przeważnie jest równa wielokrotności częstotliwości podstawowej. W przypadku asymetrii harmoniczna podstawowa regulowana jest w układzie wirującym przeciwnie do wektora napięcia sieci. Rozwiązanie to polega na selektywnej kompensacji zaburzeń, co nie pokrywa całego możliwego zakresu potencjalnych zaburzeń, a rozbudowa układu sterowania w celu zapewnienia szerszego zakresu częstotliwości wymaga zwiększenia zasobów obliczeniowych cyfrowej jednostki obliczeniowej.

Kolejne rozwiązanie stosowane w celu kompensacji zaburzeń prądu opisane w artykule autorstwa Rodríguez, P., Luna, A., Candela, I., Mujal, R., Teodorescu, R., & Blaabjerg, F. w 2011, pt. „Multi-resonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 127–138, wykorzystuje regulatory Proporcjonalno-Rezonansowe (PR) w układzie stacjonarnym. Regulatory PR również mają ograniczone pasmo regulacji, ale są zdolne do kompensacji asymetrii i zapadów napięcia. Podobnie jak w poprzednim przypadku trzeba stosować dodatkowe człony kompensujące wybrane harmoniczne.

Rozwiązanie przedstawione przez Liserre, M., Teodorescu, R., & Blaabjerg, F. w 2006, pt. „Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(3), 836–841, pokazuje połączenie technik regulacji w układzie z wirującym z regulatorami PR strojonymi na wybraną parę harmonicznych, gdzie uzyskano zmniejszenie nakładów obliczeniowych.

Celem wynalazku jest zapewnienie przekształtnika i sposobu sterowania z automatyczną kompensacją zakłóceń sieci oraz wykazującego bardzo dobrą stabilność.

Układ przekształtnika sprzężonego z siecią energetyczną napięcia przemiennego za pośrednictwem filtru, z wejściem sterującym przekształtnika połączonym z układem sterowania przekształtnika, którego wejście jest połączone z układem regulacji prądu, a pierwsze wejście układu regulacji prądu jest połączone z zadajnikiem, zaś drugie wejście układu regulacji prądu jest połączone z umieszczonym pomiędzy filtrem a przekształtnikiem czujnikiem prądu. Układ regulacji prądu jest wyposażony w regulator przyjmujący na wejściu różnicę pomiędzy sygnałem z zadajnika a sygnałem z czujnika prądu. Zgodnie z wynalazkiem układ regulacji prądu jest wyposażony w dodatkowe wejścia z których jedno jest połączone z umieszczonym na zaciskach sieci energetycznej czujnikiem napięcia, a drugie z zapewnionym w przekształtniku blokiem przetwarzania, którego wejścia są połączone z czujnikiem prądu oraz czujnikiem napięcia. Układ regulacji prądu jest wyposażony w sumator którego wyjście stanowi wyjście układu regulacji prądu a pierwsze wejście sumatora jest połączone z regulatorem, drugie wejście sumatora jest połączone z blokiem przetwarzania za pośrednictwem filtru górnoprzepustowego, zaś trzecie wejście sumatora jest połączone z czujnikiem napięcia. Badania pokazały, usunięcie składowej podstawowej – na częstotliwości pracy sieci – z reguły 50 Hz – pozostawiając w sygnale jedynie wyższe harmoniczne stanowi klucz do uzyskania efektu kompensacji zaburzeń prądu. Ponadto układ regulacji wykazuje dzięki temu bardzo dobrą stabilność.

Korzystnie regulator stanowi regulator proporcjonalno-rezonansowy albo regulator proporcjonalno całkujący.

Przekształtnik korzystnie jest sprzężony z siecią energetyczną jednofazowo lub trójfazowo.

Sposób sterowania napięciowym przekształtnikiem energoelektronicznym sprzężonym z siecią energoelektroniczną za pośrednictwem filtru sieciowego, w którym napięcie wyjściowe przekształtnika ustala się za pomocą układu regulacji prądu, z regulatorem, na którego wejście podaje się różnicę pomiędzy sygnałem reprezentującym wartość prądu zadanego a sygnałem z czujnika prądu wyjściowego filtru sieciowego, zgodnie z wynalazkiem cechuje się tym, że w układzie regulacji prądu do sygnału wyjściowego regulatora dodaje się sygnał z czujnika napięcia oraz poddany filtracji górnoprzepustowej sygnał wyjściowy bloku przetwarzania przyjmującego na wejściu sygnał z czujnika napięcia oraz sygnał z czujnika prądu.

Korzystnie sygnał w bloku przetwarzania uzyskuje się z sygnału czujnika prądu oraz sygnału czujnika napięcia rozwiązując układ równań, wiążących prąd i napięcie w filtrze L-C-L.

Przedmiot wynalazku został ukazany w przykładzie wykonania na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia schematycznie układ realizujący regulację prądu przemiennego pobieranego lub dostarczanego do sieci elektroenergetycznej a Fig. 2 przedstawia schematycznie układ ustalania sygnału zadanego napięcia sterującego układem przekształtnika energoelektronicznego.

Przykładowy układ regulacji prądu jednej fazy sieciowego przekształtnika energoelektronicznego składa się ze źródła napięcia stałego ZNS, przekształtnika energoelektronicznego PE, filtru wyjściowego F, sieci napięcia przemiennego SNP, czujnika prądu CP, czujnika napięcia CN, układu sterowania przekształtnika USP, układu regulacji prądu URP, bloku przetwarzania BP i zadajnika prądu ZAD o układzie połączeń pokazanych na Fig. 1.

Przekształtnika PE jest sprzężony z siecią energetyczną napięcia przemiennego SNP za pośrednictwem filtru F. Wejście sterujące przekształtnika PE jest połączone z układem sterowania przekształtnika USP, którego wejście jest połączone z układem regulacji prądu URP. Pierwsze wejście układu regulacji prądu URP jest połączone z zadajnikiem ZAD. Drugie wejście układu regulacji prądu URP jest połączone z czujnikiem prądu CP umieszczonym pomiędzy filtrem F a przekształtnikiem PE. Trzecie wejście układu regulacji prądu URP jest połączone z umieszczonym na zaciskach sieci energetycznej SNP czujnikiem napięcia CN. Czwarte wejście układu regulacji prądu URP jest połączone z blokiem przetwarzania BP za pośrednictwem filtru górnoprzepustowego HPF.

Układ regulacji prądu URP jest wyposażony w regulator PR, który stanowi regulator proporcjonalno rezonansowy przyjmujący na wejściu różnicę pomiędzy sygnałem i_{ZAD} z zadajnika ZAD a sygnałem i z czujnika prądu CP. Sygnał z regulatora PR jest podawany na pierwsze wejście sumatora wyposażonego w trzy wejścia. Na drugie wejście tego sumatora jest doprowadzany sygnał z bloku przetwarzania BP za pośrednictwem filtru górnoprzepustowego HPF a na trzecie wejście sygnał z czujnika napięcia CN. Sygnał wyjściowy sumatora jest wyprowadzony na wyjście układu regulacji prądu URP.

Wejścia bloku przetwarzania BP są połączone z czujnikiem prądu CP oraz czujnikiem napięcia CN. Sygnał wyjściowy bloku przetwarzania BP reprezentuje napięcie na kondensatorze filtra F przy stanowiącego dolnoprzepustowy filtr L-C-L. Do tego celu można zastosować prosty układ analogowy lub bardziej uniwersalne rozwiązanie cyfrowe.

Zgodnie ze sposobem według wynalazku sygnał odpowiadający prądowi fazowemu i uzyskany w danej chwili pomiarowej z czujnika prądu CP oraz sygnał odpowiadający napięciu u sieci napięcia przemiennego SNP uzyskany z czujnika napięcia CN przekształca się w bloku przetwarzania sygnałów BP tak, że w wyniku tego przetwarzania uzyskuje się sygnał napięcia u_c na kondensatorze w filtrze F, następnie sygnały odpowiadające: napięciu fazowemu sieci napięcia przemiennego u, napięciu na kondensatorze w filtrze sieciowym u_c , prądowi fazowemu i oraz prądowi zadanemu i_{ZAD} przekazane są do układu regulacji prądu URP. Układ regulacji prądu ustala sygnał napięcia zadanego u_{ZAD} , który podawany jest na wejście układu sterowania przekształtnika USP. Sygnał napięcia na kondensatorze u_c wyznaczany jest w bloku przetwarzania BP na podstawie sygnałów prądu fazowego i, napięcia sieci u oraz parametrów filtra sieciowego według zależności odpowiadającej prostemu filtrowi dolnoprzepustowemu L-C-L, w którym kondensator C jest włączony równolegle a indukcyjność L_2 szeregowo:

$$u_c = \frac{1}{C} \int (i - i_{L2}) dt$$

$$i_{L2} = \frac{1}{L_2} \int (u_c - u) dt$$

gdzie: i_{L2} oznacza prąd wyjściowy filtra, L_2 – indukcyjność wyjściowa filtra, C oznacza pojemność kondensatora filtra.

Dzięki zastosowaniu sposobu według wynalazku uzyskuje się kompensację zaburzeń prądów fazowych napięciowych przekształtników energoelektronicznych sprzężonych z siecią energoelektroniczną. Sygnały napięcia fazowego sieci i filtrowanego górnoprzepustowo sygnału napięcia na kondensatorze filtra sieciowego są dodawane do sygnału wyjściowego regulatora prądu fazowego ustalając napięcie wyjściowe przekształtnika energoelektronicznego. Sygnały dodawane do wyjścia regulatora prądu równoważą napięcie wyjściowe przekształtnika z napięciem na kondensatorze dzięki czemu zaburzenia prądu są minimalizowane w momencie wystąpienia zaburzeń w napięciu sieci elektroenergetycznej, dodatkowo uzyskuje się zwiększenie stabilności pracy układu. Usunięcie składowej podstawowej 50 Hz z napięcia na kondensatorze, przy pozostawieniu w sygnale jedynie wyższe harmonicznych jest kluczowe dla uzyskania efektu kompensacji zaburzeń prądu. Również dzięki temu układ regulacji nieoczekiwanie wykazuje bardzo dobrą stabilność.

Wymagania stawiane sieciowym układom przekształtnikowym dotyczą przede wszystkim utrzymania jak najwyższej jakości przetwarzanej energii określanej jako utrzymanie czysto sinusoidalnego przebiegu prądu oraz zapewnieniu nieprzerwanej pracy. Dzięki temu uzyskuje się efekt w postaci utrzymania lub poprawy jakości napięcia w sieci elektroenergetycznej, a energia elektryczna jest zarządzana w sposób bardziej efektywny minimalizując straty.

Wynalazek można zastosować zarówno przy sprzężeniu jednofazowym jak i przy wielofazowym. W tym ostatnim przypadku układ wymaga zwielokrotnienia dla każdej z faz.

Regulator proporcjonalno całkujący można zastąpić regulatorem proporcjonalno-całkującym. W takiej sytuacji zasadne jest przekształcenia sygnału przemiennego na stały, a potem z powrotem stałego na przemienny.

Zastosowanie wynalazku jest szczególnie korzystne w sieciowych układach przekształtnikowych stosowanych jako: przetworniki energii elektrycznej w odnawialnych źródłach energii, filtry aktywne, układy kompensacji mocy biernej oraz transformatory energoelektroniczne.

Zastrzeżenia patentowe

1. Układ przekształtnika (PE) sprzężonego z siecią energetyczną napięcia przemiennego (SNP) za pośrednictwem filtra (F), przy czym wejście sterujące przekształtnika (PE) jest połączone z układem sterowania przekształtnika (USP), którego wejście jest połączone z układem regulacji prądu (URP), a

- pierwsze wejście układu regulacji prądu (URP) jest połączone z zadajnikiem (ZAD), zaś drugie wejście układu regulacji prądu (URP) jest połączone z umieszczonym pomiędzy filtrem (F) a przekształtnikiem (PE) czujnikiem prądu (CP), przy czym układ regulacji prądu (URP) jest wyposażony w regulator (PR) przyjmujący na wejściu różnicę pomiędzy sygnałem (i_{ZAD}) z zadajnika (ZAD) a sygnałem (i) z czujnika prądu (CP), **znamienny tym**, że układ regulacji prądu (URP) jest wyposażony w dodatkowe wejścia z których jedno jest połączone z umieszczonym na zaciskach sieci energetycznej (SNP) czujnikiem napięcia (CN), a drugie z zapewnionym w przekształtniku blokiem przetwarzania (BP), którego wejścia są połączone z czujnikiem prądu (CP) oraz czujnikiem napięcia (CN), przy czym układ regulacji prądu (URP) jest wyposażony w sumator którego wyjście stanowi wyjście układu regulacji prądu (URP) a
- pierwsze wejście sumatora jest połączone z regulatorem proporcjonalno rezonansowym,
 - drugie wejście sumatora jest połączone z blokiem przetwarzania (BP) za pośrednictwem filtra górnoprzepustowego (HPF), zaś
 - trzecie wejście sumatora jest połączone z czujnikiem napięcia (CN).
2. Układ przekształtnika (PE) według zastrz. 1, **znamienny tym**, że regulator (PR) stanowi regulator proporcjonalno-rezonansowy.
 3. Układ przekształtnika (PE) według zastrz. 1, **znamienny tym**, że regulator stanowi proporcjonalno całkujący.
 4. Układ przekształtnika (PE) według zastrz. 1 albo 2 albo 3, **znamienny tym**, że przekształtnik (PE) jest sprzężony z siecią energetyczną jednofazowo.
 5. Układ przekształtnika według zastrz. 1 albo 2 albo 3, **znamienny tym**, że przekształtnik (PE) jest sprzężony z siecią energetyczną (SNP) trójfazowo.
 6. Sposób sterowania napięciowym przekształtnikiem (PE) energoelektronicznym sprzężonym z siecią energoelektroniczną (SNP) za pośrednictwem filtra sieciowego (F), w którym napięcie wyjściowe przekształtnika ustala się za pomocą układu regulacji prądu (URP), z regulatorem (PR), na którego wejście podaje się różnicę pomiędzy sygnałem reprezentującym wartość prądu zadanego (i_{ZAD}) a sygnałem z czujnika (CP) prądu (i) wejściowego filtra sieciowego (F), **znamienny tym**, że w układzie regulacji prądu (URP) do sygnału wyjściowego regulatora (PR) dodaje się sygnał (u) z czujnika napięcia (CN) oraz sygnał wyjściowy (u_c) bloku przetwarzania (BP) przyjmującego na wejściu sygnał (u) z czujnika napięcia oraz sygnał (i) z czujnika prądu (CP).
 7. Sposób według zastrz. 7, **znamienny tym**, że sygnał (u_c) w bloku przetwarzania (BP) uzyskuje się z sygnału (i) czujnika prądu (CP) oraz sygnału (u) czujnika napięcia (CN) rozwiązując układ równań:

$$\begin{cases} u_c = \frac{1}{C} \int (i - i_{L2}) dt \\ i_{L2} = \frac{1}{L_2} \int (u_c - u) dt \end{cases}$$

Rysunki

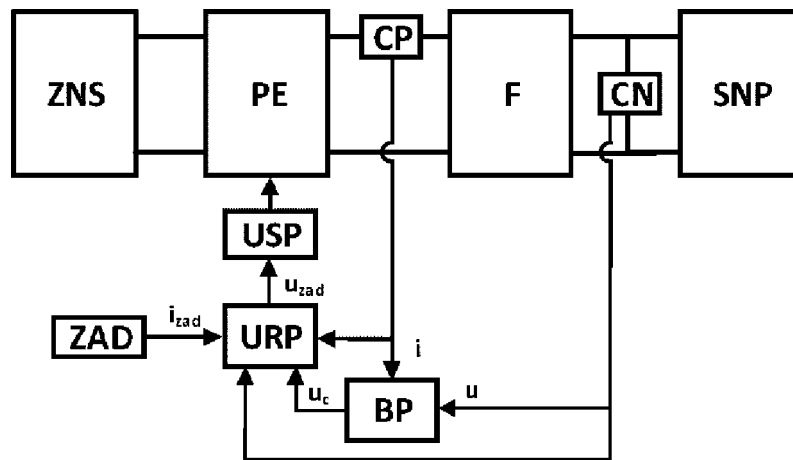


Fig. 1

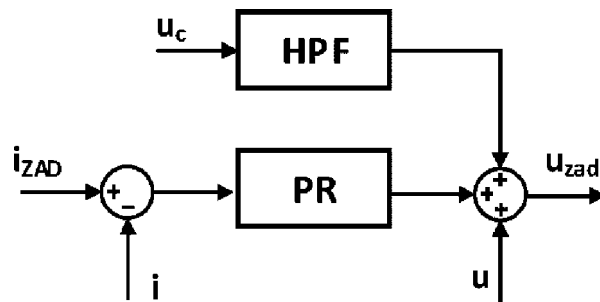


Fig. 2