

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **226872**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **387911**

(51) Int.Cl.
H02J 7/04 (2006.01)
H02M 3/335 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **29.04.2009**

(54) **Sposób sterowania układem trójfazowej przetwornicy rezonansowej prądu stałego z filtrem wyjściowym drugiego rzędu C L do ładowania baterii akumulatorów**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
08.11.2010 BUP 23/10

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
29.09.2017 WUP 09/17

(73) Uprawniony z patentu:

**ELPOL-CENTRUM ELEKTRONIKI
I AUTOMATYKI SPÓŁKA CYWILNA
JERZY SZYMAŃSKI/WIESŁAWA SZYMAŃSKA,
Radom, PL
P. P. H. U. EWA KOMPA, Biała Podlaska, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**BERNARD SZYMAŃSKI, Warszawa, PL
KAMIL KOMPA, Biała Podlaska, PL**

(74) Pełnomocnik:

recz. pat. Igor Sawicki

PL 226872 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób sterowania układem trójfazowej przetwornicy rezonansowej prądu stałego z filtrem wyjściowym drugiego rzędu C L do ładowania baterii akumulatorów.

W dotychczasowych znanych rozwiązaniach przemysłowych do ładowania akumulatorów stosowane są układy niskoczęstotliwościowe, twardo przełączane, charakteryzujące się tym, iż klucze półprzewodnikowe przełączane są przy niezerowym prądzie lub przy niezerowym napięciu. Z powodu niskiej częstotliwości pracy urządzenia te mają duże gabaryty, a ponadto charakteryzują się niską wydajnością z powodu twardego przełączania kluczy półprzewodnikowych.

W ostatnich latach trwają prace nad rezonansowymi przetwornicami do ładowania baterii akumulatorów. W literaturze przedmiotu, w zakresie układów jednofazowych, opisane są przetwornice wykorzystujące przełączanie przy zerowym prądzie [Battery charging system in photovoltaic application – B.J. Szymanski, Antoni Dmowski, X international PhD Workshop 2008] lub przy zerowym napięciu [A Novel High-Efficiency Battery Charger With a Buck Zero-Voltage-Switching Resonant Converter – Ying-Chun Chuang and Yu-Lung Ke, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007]. Rozwiązanie takie znacznie poprawia sprawność układu, a dzięki wysokiej częstotliwości pracy np. 100kHz urządzenia te charakteryzują się małymi rozmiarami.

W innej literaturze [„A Novel Three-Phase DC/DC Converter for High-Power Applications” – J.Jacobs, A.Averberg, R. De Doncker, 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC), Aachen, Germany, 2004] opisane są też trójfazowe wysokosprawne układy rezonansowe mogące przekształcać znacznie wyższe poziomy energii. Jednakże mogą one pracować jedynie z obciążeniem rezystancyjnym – tzw. transformatory napięcia stałego. Ich istotną wadą jest to, że nie mogą pracować w trybie regulacji prądu z obciążeniem napięciowym takim jak akumulator lub bateria akumulatorów.

Sposób sterowania tymi układami może odbywać się z zastosowaniem różnych metod. Należą do nich między innymi: metoda sterowania częstotliwościowego i metoda sterowania gęstością impulsów (z ang. Pulse Density Modulation).

Celem wynalazku jest opracowanie nowego układu przetwornicy rezonansowej pozwalającego na energooszczędną pracę w charakterze źródła prądowego, charakteryzującym się w pełni regulowanym poziomem prądu wyjściowego, niezależnie od napięcia obciążenia (napięcia akumulatora lub baterii akumulatorów), w którym prąd wyjściowy ma ciągłą wartość w całym zakresie regulacji.

Sposób sterowania układem trójfazowej przetwornicy rezonansowej prądu stałego z filtrem wyjściowym drugiego rzędu C L do ładowania baterii akumulatorów według wynalazku charakteryzuje się tym, iż sterowanie układem w poszczególnych fazach ładowania baterii akumulatorów odbywa się zarówno poprzez zmianę częstotliwości przełączeń kluczy półprzewodnikowych (tzw. sterowanie częstotliwościowe), jak również poprzez zmianę gęstości impulsów prądu i napięcia obwodu rezonansowego (tzw. sterowanie gęstością impulsów), gdzie sterowanie częstotliwościowe stosuje się, gdy na wyjściu obwodu jest dostarczany prąd o stałej wartości, a napięcie na wyjściu układu jest niskie, aż do momentu gdy napięcie na wyjściu układu jest wysokie i prąd na wyjściu układu należy zmniejszać, przy czym zmniejszanie prądu wyjściowego odbywa się poprzez zwiększenie częstotliwości przełączeń kluczy półprzewodnikowych S1, S2, S3, S4, S5, S6, a następnie, gdy na wyjściu ma być utrzymany niższy prąd niż wynika to z ograniczenia sterowania częstotliwościowego, sterowanie częstotliwościowe zmienia się na sterowanie gęstością impulsów, realizowane poprzez dostarczanie paczek energii – impulsów doprowadzanych do obwodu rezonansowego przy stałej częstotliwości przełączeń kluczy półprzewodnikowych S1, S2, S3, S4, S5, S6, przy czym gęstość dostarczanych impulsów zależna jest wprost proporcjonalnie od wartości prądu potrzebnego na wyjściu układu.

Korzystnie jest, gdy podczas sterowania gęstością impulsów tranzystory sterowane są ze stałą częstotliwością, będącą granicą sterowania częstotliwościowego.

Wynalazek został objaśniony na przykładzie realizacji i na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat układu trójfazowej przetwornicy rezonansowej prądu stałego z filtrem wyjściowym drugiego rzędu C L do ładowania baterii akumulatorów, fig. 2 przedstawia zakres obszarów pracy układu.

Układ trójfazowej przetwornicy rezonansowej prądu stałego z filtrem wyjściowym drugiego rzędu C L do ładowania baterii akumulatorów stanowi trójfazowy falownik szeregowy rezonansowy, składający się z kluczy półprzewodnikowych S1, S2, S3, S4, S5, S6, zawierający zewnętrzne dławiki rezonansowe L_R , kondensator rezonansowy C_R , trójfazowy transformator T, prostownik diodowy składa-

jący się z diod D1, D2, D3, D4, D5, D6 oraz kondensator C, do których to elementów układu dołączony jest dodatkowo dławik L, dioda D i warystor W, tak jak to zostało uwidocznione na fig. 1.

Przykładowy proces ładowania baterii, przedstawiony na krzywej Charakterystyki Ładowania Baterii, zamieszczonej na fig. 2, rozpoczyna się od punktu nazwanego granicą głębokiego rozładowania, a oznaczonego literą A. W tej fazie ładowania bateria akumulatorów ładowana jest prądem o stałej wartości np. 25A. W tym czasie napięcie baterii podnosi się, podczas gdy prąd należy utrzymywać na niezmiennym poziomie. Wraz ze wzrostem napięcia baterii częstotliwość pracy tranzystorów zmienia się utrzymując jednocześnie stały prąd ładowania.

Napięcie baterii wzrasta przechodząc przez punkt napięcia buforowego i następnie docierając do punktu, gdzie kończy się ładowanie automatyczne, co ukazuje punkt B na krzywej Charakterystyki Ładowania Baterii, zamieszczonej na fig. 2. Wtedy należy znacznie ograniczyć prąd ładowania utrzymując stałe napięcie na baterii. W przykładzie realizacji wg wynalazku odbywa się to poprzez zwiększenie częstotliwości pracy tranzystorów, co zmniejsza prąd ładowania baterii. Częstotliwość zmniejszana jest dochodząc do punktu C, gdzie należy przełączyć urządzenie na sterowanie gęstością impulsów. W tym trybie prąd zostaje zmniejszony aż do zera – co ukazuje prosta pomiędzy punktami C i D na fig. 2.

Sterowanie gęstością impulsów występuje na krzywej Charakterystyki Ładowania Baterii między punktami C i D. Przy wykorzystaniu jedynie sterowania częstotliwościowego nie byłoby możliwe uzyskanie charakterystyki ładowania baterii akumulatorów. Technikę sterowania modulacją gęstości impulsów stosuje się, gdy na wyjściu ma być utrzymany niższy prąd niż wynika to z ograniczenia sterowania częstotliwościowego.

Dzięki zastosowaniu filtra wyjściowego drugiego rzędu składającego się z dławika L, kondensatora C, a także zastosowaniu metody sterowania gęstością impulsów – prąd wyjściowy wpływający do obciążenia jest ciągły.

Uzyskanie przedstawionej na fig. 2. Charakterystyki Ładowania Baterii jest możliwe poprzez zastosowanie w obwodzie wyjściowym filtra drugiego rzędu C L oraz zewnętrznych dławików L_R , a także zastosowanie połączonych sterowań tj. częstotliwościowego i gęstością impulsów. W rozwiązaniach znanych ze stanu techniki, gdzie stosuje się wyłącznie kondensator C, jako filtr na wyjściu układu, prąd wyjściowy byłby impulsowy – przy sterowaniu gęstością impulsów i napięciowym obciążeniu układu.

Dławik L tworzy z kondensatorem C filtr wyjściowy drugiego rzędu. Odpowiedni dobór stosunku C do L pozwala na dynamiczną regulację prądu na wyjściu urządzenia przy sterowaniu gęstością impulsów i danych parametrach obwodu rezonansowego falownika.

W dotychczasowych, znanych ze stanu techniki rozwiązaniach, wykorzystywana jest indukcyjność rozproszenia transformatora T, a pomijana dodatkowa dodana indukcyjność zewnętrzna L_R . Wykorzystanie tylko indukcyjności rozproszenia transformatora T pozwala na poprawną i nisko strątną pracę przekształtnika, ale tylko w charakterze źródła napięcia.

Przy różnicy napięcia obciążenia względem napięcia zasilania falownika, biorąc pod uwagę przekładnię transformatora (praca pod obciążeniem o charakterze napięciowym), impedancja dławików L_R jest jedynym elementem obwodu, na którym może odłożyć się potrzebna różnica napięć, przy przepływie wymaganej wartości prądu. Dzieje się tak, o ile założymy sterowanie częstotliwościowe falownika powyżej częstotliwości rezonansowej obwodu $L_R C_R$. Sterowanie takie daje najbardziej optymalne warunki przełączania tranzystorów (przełączanie przy zerowym prądzie i zerowym napięciu).

Jeżeli indukcyjność szeregową L_R jest mała, to w zakresie częstotliwości dostępnym dla falownika tranzystorowego, nie da się ograniczyć prądu do potrzebnej wartości przez sterowanie częstotliwościowe. Przy braku dławików układ nie może zatem pracować z obciążeniem napięciowym lub przy zwarcu na obciążeniu.

Dzięki zastosowaniu zewnętrznych dławików L_R i metody sterowania częstotliwościowego (przełączanie kluczy półprzewodnikowych z częstotliwością powyżej częstotliwości rezonansowej obwodu L_R i C_R) możliwa jest praca urządzenia począwszy od zwarcia (lub przy małym napięciu początkowym baterii akumulatorów) na obciążeniu urządzenia – punkt A na fig. 2.

Zastosowanie filtra drugiego rzędu C L wraz ze sterowaniem gęstością impulsów pozwala na ciągłą regulację prądu na odcinku C D. Regulacja ta nie byłaby możliwa przy braku filtra wyjściowego drugiego rzędu C i L i przy zastosowaniu tylko metody sterowania częstotliwościowego.

Jeśli częstotliwość pracy kluczy półprzewodnikowych znajduje się powyżej częstotliwości rezonansowej obwodu $C_R L_R$, nie jest wówczas możliwa dowolna regulacja wartości prądu wyjściowego. Minimalny prąd wyjściowy przy zwarcu na obciążeniu urządzenia lub przy małym napięciu ładowanej baterii akumulatorów jest wysoki i nie daje się go obniżyć bardziej metodą częstotliwościową – punkt A na fig. 2.

Na fig. 2 przedstawiono krzywe (150 kHz, 200 kHz) pokazujące, przy jakim poziomie napięcia wyjściowego będzie płynął dany prąd w obciążeniu, przy sterowaniu falownika z daną częstotliwością. Widać, że im dalej od częstotliwości rezonansowej ($200 \text{ kHz} > 150 \text{ kHz} > \text{częstotliwość rezonansowa} = 100 \text{ kHz}$), tym mniejszy prąd płynie przy danym poziomie napięcia obciążenia na wyjściu falownika. Zakładając sterowanie falownika tranzystorowego z maksymalną dostępną częstotliwością, w przykładzie równą 200 kHz, prąd jest odpowiednio ograniczony nawet w czasie zwarcia na obciążeniu urządzenia (zawsze poniżej prądu nominalnego). Przy wyższych poziomach napięcia na wyjściu prąd zmniejsza się i można go ponownie zwiększać poprzez zbliżanie częstotliwości pracy do rezonansu. Nie jest jednak możliwe dostarczanie prądu wyjściowego o mniejszej wartości, niż to wynika z charakterystyki 200 kHz i wtedy należy stosować sterowanie gęstością impulsów (prosta C i D). W tym przypadku technikę sterowania częstotliwościowego stosuje się, gdy na wyjściu obwodu napięcie jest wysokie i ma być dostarczany prąd o dużej wartości.

Przy wykorzystaniu jedynie sterowania częstotliwościowego nie byłoby możliwe uzyskanie charakterystyki ładowania baterii akumulatorów. Sterowanie gęstością impulsów stosowane jest w obszarze, gdzie na wyjściu układu ma być utrzymany niższy prąd niż wynika to z ograniczenia sterowania częstotliwościowego (krzywa F = 200 kHz na fig. 2). Prąd na krzywej CD jest zmniejszany od wartości wynikającej ze sterowania częstotliwościowego, aż do zera.

W obszarze gdzie stosowane jest sterowanie metodą gęstości impulsów, regulacja mocy wyjściowej odbywa się na zasadzie dostarczania paczek energii (np. 3 na 10 impulsów doprowadzanych do obwodu rezonansowego przy stałej częstotliwości pobudzania obwodu rezonansowego). W przypadku sterowania gęstością impulsów tranzystory sterowane są ze stałą częstotliwością (w przykładzie 200 kHz), będącą granicą sterowania częstotliwościowego. Ogranicza to amplitudę prądu doładowującego pojemność C w czasie trwania pierwszych impulsów w każdej paczce.

Wykorzystanie zjawiska rezonansu elektromagnetycznego i miękkiej techniki przełączania tranzystorów falownika (typu ZVS/ZCS – przełączanie tranzystorów przy zerowym napięciu i zerowym prądzie) oraz wysokiej częstotliwości pracy tranzystorów, pozwala uzyskać urządzenie o mniejszych rozmiarach i wyższej sprawności (= 96%) niż w przypadku znanych rozwiązań. Jednocześnie zachowane zostały wszelkie pozytywne właściwości pracy mniej wydajnych źródeł twardo przełączanych. Przede wszystkim jest to możliwość utrzymania dowolnego poziomu prądu przy dowolnym stanie napięcia wyjściowego i zachowaniu ciągłości prądu. Zarówno przy pracy w trybie sterowania gęstością impulsów jak i w trybie sterowania częstotliwościowego, falownik zachowuje optymalne warunki przełączania kluczy półprzewodnikowych i niskie straty.

Zaletą w stosunku do dotychczasowych rozwiązań jest charakterystyczna, prosta w budowie, topologia połączona z odpowiednim sterowaniem, umożliwiającą regulację mocy wyjściowej w bardzo szerokim zakresie.

Dzięki nisko stralnym technikom przełączeń kluczy półprzewodnikowych, uzyskanych dzięki wykorzystaniu zjawiska rezonansu elektromagnetycznego, układ przetwarza energię elektryczną z wysoką wydajnością w całym obszarze pracy. Ponadto może pracować zarówno z obciążeniem rezystancyjnym jak i napięciowym takim jak bateria akumulatorów.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób sterowania układem trójfazowej przetwornicy rezonansowej prądu stałego z filtrem wyjściowym drugiego rzędu C L do ładowania baterii akumulatorów, **znamienny tym**, że sterowanie układem w poszczególnych fazach ładowania baterii akumulatorów odbywa się zarówno poprzez zmianę częstotliwości przełączeń kluczy półprzewodnikowych (tzw. sterowanie częstotliwościowe), jak również poprzez zmianę gęstości impulsów prądu i napięcia obwodu rezonansowego (tzw. sterowanie gęstością impulsów), gdzie sterowanie częstotliwościowe stosuje się, gdy na wyjściu obwodu jest dostarczany prąd o stałej wartości, a napięcie na wyjściu układu jest niskie, aż do momentu gdy napięcie na wyjściu układu jest wyso-

kie i prąd na wyjściu układu należy zmniejszać, przy czym zmniejszanie prądu wyjściowego odbywa się poprzez zwiększenie częstotliwości przełączeń kluczy półprzewodnikowych **S1, S2, S3, S4, S5, S6**, a następnie, gdy na wyjściu ma być utrzymany niższy prąd niż wynika to z ograniczenia sterowania częstotliwościowego, sterowanie częstotliwościowe zmienia się na sterowanie gęstością impulsów, realizowane poprzez dostarczanie paczek energii – impulsów doprowadzanych do obwodu rezonansowego przy stałej częstotliwości przełączeń kluczy półprzewodnikowych **S1, S2, S3, S4, S5, S6**, przy czym gęstość dostarczanych impulsów zależna jest wprost proporcjonalnie od wartości prądu potrzebnego na wyjściu układu.

2. Sposób według zastrz. 2, **znamienny tym**, że podczas sterowania gęstością impulsów tranzystory sterowane są ze stałą częstotliwością, będącą granicą sterowania częstotliwościowego.

Rysunki

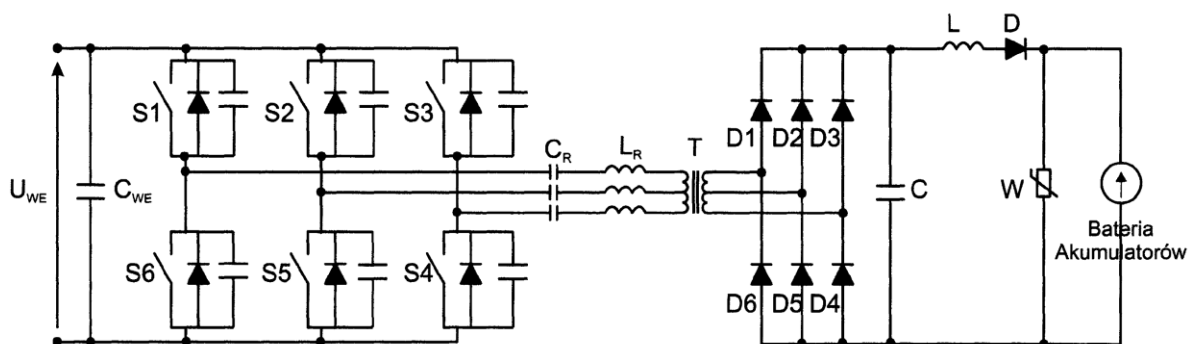


FIG. 1

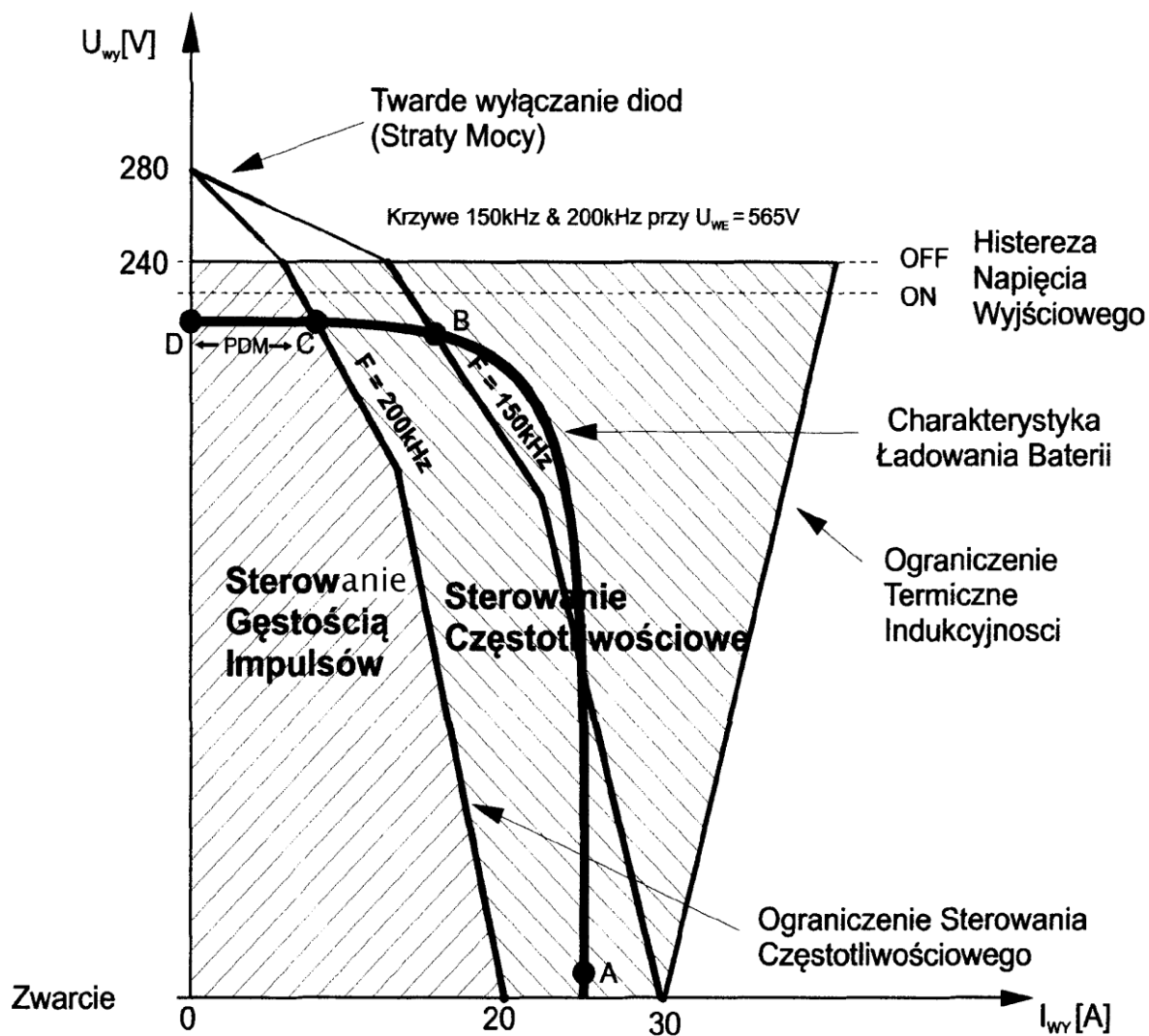


FIG. 2