

doi:10.15199/48.2018.05.14

Transformator hybrydowy z dwubiegunowym przekształtnikiem AC/AC bez magazynu energii DC

Streszczenie.

Artykuł przedstawia transformator hybrydowy (TH) z dwubiegunowym przekształtnikiem AC/AC do łagodzenia wahań napięcia, zapadów i przepięć w systemie elektroenergetycznym. Proponowane rozwiązanie charakteryzuje się szerokim zakresem sterowania napięcia i dobrą dynamiką. Ponadto zapewnia separację galwaniczną pomiędzy źródłem a obciążeniem. W artykule zamieszczono opis działania układu TH oraz wyniki badań eksperymentalnych modelu laboratoryjnego o mocy 1 kVA, pracującego w zamkniętej pętli sterowania.

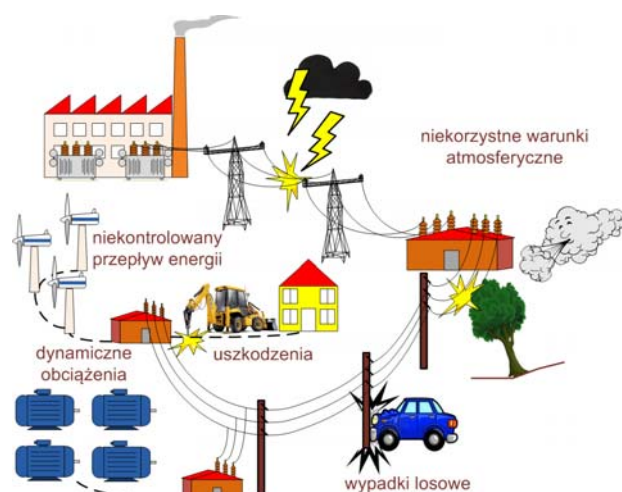
Abstract. This paper presents a hybrid transformer (HT) with a bipolar AC/AC converter to mitigate voltage fluctuation, voltage sag and swell in AC power grid. Proposed solution is characterized by a wide range of voltage control and good dynamics. Moreover provides galvanic separation between source and load. The article describes the operation principle of the HT and the results of experimental research of a 1 kVA laboratory model operating in closed control loop. (*The hybrid transformer with a bipolar AC/AC converter without DC energy storage.*)

Słowa kluczowe: jakość energii, sterowanie napięcia, przekształtnik ac-ac, sterownik matrycowy.

Keywords: power quality, voltage control, ac-ac converters, matrix chopper.

Wstęp

Amplituda napięcia jest jednym z najważniejszych parametrów jakościowych energii elektrycznej. Parametry energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych są ściśle określone [1]. Jednak w wyniku rozmaitych stanów dynamicznych występujących w systemie elektroenergetycznym, powodowanych przez zjawiska łączeniowe, niekorzystne warunki atmosferyczne, niekontrolowane warunki atmosferyczne, przyływy energii, dynamiczne zmiany obciążenia, itp. (rys. 1), amplituda napięcia ulega zmianom. Zmiany amplitudy napięcia, wahaniami, gwałtowne skoki, zapady, przepięcia, mogą powodować niewłaściwą pracę urządzeń elektrycznych, a nawet ich uszkodzenia [2], co w przypadku odbiorców przemysłowych prowadzi do znacznych strat finansowych.

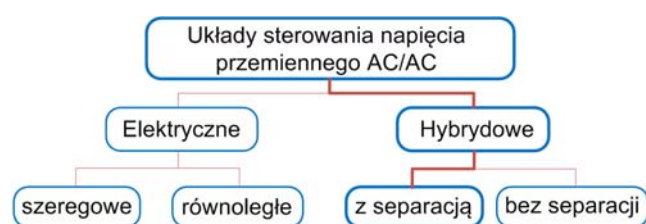


Rys.1. Główne przyczyny wahań napięcia w systemie elektroenergetycznym

Roczne koszty powodowane zapadami i zanikami napięcia w Europie szacowane są na 10 miliardów euro, podczas gdy działania prewencyjne pozwalające uniknąć tak wysokich kosztów szacuje się na około 5% tej kwoty [3], [4]. Ponad połowa tych kosztów generowana jest w sektorze przemysłowym, reszta w sektorach publicznym – ok. 9%, i usługowym – ok. 32% [4]. Biorąc pod uwagę powyższe, kwestia utrzymania odpowiednich parametrów jakościowych energii elektrycznej, a zwłaszcza amplitudy

napięcia w sieci elektroenergetycznej staje się problemem nie tylko technicznym, ale również ekonomicznym.

Ochronę urządzeń elektrycznych przed niepożądanymi parametrami zasilania z jednej strony realizuje się przez podnoszenie odporności urządzeń na zaburzenia napięcia [5], z drugiej strony przez implementację układów sterowania napięcia przemiennego, przeznaczonych do łagodzenia i eliminacji wahań napięcia w sieci elektroenergetycznej. Istnieje wiele rozwiązań układów sterowania napięcia, nazywanych w literaturze kompensatorami napięcia, kondycjonerami napięcia, regulatorami, stabilizatorami, itp. Pod względem sposobu przekształcania energii można je podzielić (rys. 2) na układy elektryczne [6]–[8], których topologia bazuje na energoelektronicznych przekształtnikach AC/DC/AC lub AC/AC oraz układy hybrydowe [9]–[19], gdzie energoelektroniczny przekształtnik AC/AC współpracuje z transformatorem elektromagnetycznym. Ponadto hybrydowe układy transformowania napięcia przemiennego można podzielić na układy z separacją galwaniczną pomiędzy źródłem a obciążeniem [9]–[15] oraz układy bez separacji [16]–[19].



Rys.2. Podział układów sterowania napięcia przemiennego

Układy sterowania napięcia przemiennego opisane w [6]–[8] charakteryzują się dobrą dynamiką, jednak nie gwarantują separacji galwanicznej pomiędzy źródłem a obciążeniem. Separacja galwaniczna jest często kluczowa w systemie elektroenergetycznym, zwłaszcza z punktu widzenia bezpieczeństwa i dopasowania poziomów napięcia w poszczególnych punktach systemu. Dodatkowo uszkodzenie przekształtnika, w przypadku [6] i [7], będzie skutkowało koniecznością odłączenia zasilania po stronie odbiornika, co przekłada się na obniżenie niezawodności tych rozwiązań. Ponadto układ opisany w [8] jest rozwiązaniem równoległym, co biorąc pod uwagę zasadę

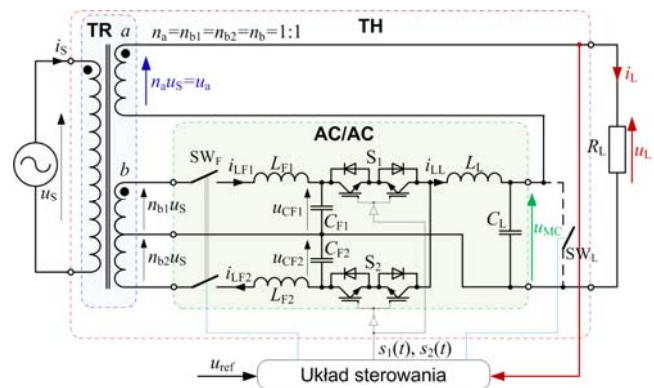
działania, zawęża zakres regulacji napięcia. Hybrydowe układy transformowania napięć przemiennych bez separacji galwanicznej zazwyczaj włączona są szeregowo z linią zasilającą za pomocą transformatora dodatkowego [16]-[19]. Charakteryzują się dobrą dynamiką oraz, w porównaniu do układów opisanych w [6]-[8], wyższym współczynnikiem sprawności, ze względu na to, że tylko część energii niezbędna do kompensacji napięcia przepływa przez przekształtnik. Ponadto w przypadku uszkodzenia przekształtnika nie ma konieczności odłączania odbiorców od zasilania, co wpływa na zwiększenie niezawodności układu. Jednak opisane powyżej układy nie zapewniają separacji galwanicznej pomiędzy źródłem a obciążeniem. Taką cechą mają hybrydowe układy transformowania napięć przemiennych z separacją galwaniczną [9]-[15], w których przekształtnik AC/AC odpowiedzialny za sterowanie napięciem współpracuje z transformatorem elektromagnetycznym realizującym separację galwaniczną. Układy tego typu [9]-[15] charakteryzują się dobrą dynamiką i często szerokim zakresem sterowania napięcia wyjściowego, co pozwala na kompensację głębokich spadków napięcia i przepięć (nawet do $\pm 50\% U_S$). Jednak w wielu przypadkach stopień niezawodności tych układów jest niewystarczający. W przypadku rozwiązań [9]-[11] po uszkodzeniu przekształtnika AC/AC, ze względu na zastosowane przekładnie transformatora, napięcie wyjściowe (U_L) będzie niższe od napięcia wejściowego (U_S) ($U_L = 2/3 U_S$). Podobnie jest w przypadku [13], gdzie całość energii ze źródła jest przekazywana przez przekształtnik i transformator. W przypadku uszkodzenia któregoś z elementów konieczne jest odłączenie obciążenia od zasilania, co obniża niezawodność takiego rozwiązania. Zakres sterowania napięcia w przypadku rozwiązania opisanego w [12] wynosi $\pm 20\% U_S$. Zastosowanie przekształtnika matrycowego zwiększa stopień złożoności układu, jednak pozwala na zwiększenie funkcjonalności o możliwość sterowania wejściowym współczynnikiem mocy. Dużą funkcjonalność zapewnia również układ transformatora hybrydowego opisanego w [15], wykorzystującego transformator wysokiej częstotliwości do realizacji separacji galwanicznej. Jednak jest ona okupiona dużą złożonością układu, co przekłada się na niezawodność. Ponadto uszkodzenie modułu przekształtnika uniemożliwia dalszą pracę transformatora, co również obniża niezawodność. Biorąc pod uwagę powyższe, należy szukać rozwiązań, które obok dobrych właściwości dynamicznych, szerokiego zakresu sterowania napięcia i realizacji separacji galwanicznej, będą zapewniały wysoką niezawodność zasilania.

Głównym celem artykułu jest przedstawienie koncepcji oraz analiza właściwości transformatora hybrydowego (TH) z dwubiegunowym przekształtnikiem AC/AC, pracującego w zamkniętej pętli sterowania. Artykuł jest rozwinięciem układu opisanego w [20] o implementację układu sterowania z zamkniętą pętlą sterowania, bazującego na detektorze wartości szczytowej. Proponowane rozwiązanie przeznaczone jest do zastosowań w nowoczesnych sieciach dystrybucyjnych AC w celu poprawy parametrów napięciowych. W kolejnych rozdziałach przedstawiono opis działania analizowanego układu oraz wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na modelu laboratoryjnym o mocy znamionowej 1 kVA.

Opis działania

Schemat analizowanego jednofazowego transformatora hybrydowego pokazano na rysunku 3. Głównymi elementami są transformator TR i przekształtnik AC/AC. Transformator TR wyposażony jest w dwa uzwojenia wtórne a i b . Uzwojenie a jest uzwojeniem głównym,

uzwojenie dodatkowe b posiada centralnie wyprowadzony odczep, symetrycznie dzielący uzwojenie b na uzwojenia b_1 i b_2 . Przekładnie poszczególnych uzwojeń wynoszą $n_a=n_{b1}=n_{b2}=n_b=1:1$. Przekształtnik AC/AC zasilany jest przez filtr dolnoprzepustowy $L_{F1}C_{F1}$, $L_{F2}C_{F2}$ z uzwojenia dodatkowego b . Przekształtnik AC/AC bazuje na topologii klasycznego jednobiegunowego sterownika matrycowego (SM) o charakterze obniżającym napięcie. Na wyjściu przekształtnika znajduje się dolnoprzepustowy filtr $L_L C_L$. Opcjonalnie przekształtnik może być wyposażony w łączniki SW_F i SW_L (rys. 3). W trakcie pracy łącznik SW_F jest zamknięty, natomiast SW_L , pełniący rolę łącznika obejściowego (bypass), jest otwarty. W przypadku uszkodzenia przekształtnika AC/AC łącznik SW_F zostaje otwarty, a SW_L zamknięty. W takim wypadku TH pracuje jak klasyczny transformator, bez możliwości sterowania napięcia wyjściowego.



Rys.3. Jednofazowy transformator hybrydowy z dwubiegunowym przekształtnikiem AC/AC

Łączniki S_1 i S_2 sterowane są klasyczną metodą modulacji szerokości impulsu PWM z czasem martwym. W czasie włączenia łącznika S_1 , łącznik S_2 pozostaje wyłączony. Pomijając spadki napięcia na elementach przekształtnika napięcie wyjściowe \underline{U}_{MC} jest równe napięciu \underline{U}_{b1} i jest w fazie z napięciem \underline{U}_S . W czasie gdy przewodzi łącznik S_2 , łącznik S_1 pozostaje wyłączony, a napięcie \underline{U}_{MC} jest równe $-\underline{U}_{b2}$ i jest w przeciwfazie względem napięcia \underline{U}_S . Pozwala to uzyskać na wyjściu przekształtnika AC/AC napięcie \underline{U}_{MC} o charakterze dwubiegunowym. W porównaniu do klasycznego dwubiegunowego mostkowego przekształtnika AC/AC, wymagającego czterech łączników dwukierunkowych [21], analizowany układ wymaga tylko dwóch. Uzwojenie główne a jest połączone szeregowo z wyjściem przekształtnika AC/AC (rys. 3). W związku z tym napięcie na obciążeniu \underline{U}_L jest sumą napięć \underline{U}_{MC} i \underline{U}_a (1).

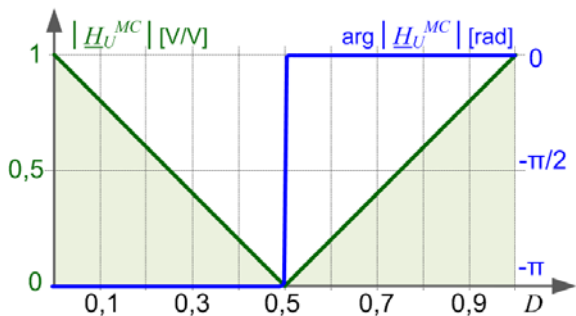
$$(1) \quad \underline{U}_L = \underline{U}_{MC} + \underline{U}_a$$

Wartość napięcia wyjściowego \underline{U}_{MC} zależy od współczynnika wypełnienia impulsu D [21] (2). Zgodnie z (2) transmitancja napięciowa (wzmocnienie) określone jest równaniem (3) i pokazana na rysunku 4.

$$(2) \quad \underline{U}_{MC} = n_a \underline{U}_S (2D - 1)$$

$$(3) \quad \left| \underline{H}_U^{MC} \right| = \left| \frac{\underline{U}_{MC}}{\underline{U}_S} \right| \cong |n_a (2D - 1)|$$

Dla współczynnika wypełnienia impulsu D w zakresie od 0 do 0,5 napięcie wyjściowe przekształtnika \underline{U}_{MC} jest w przeciwfazie względem napięcia \underline{U}_S .

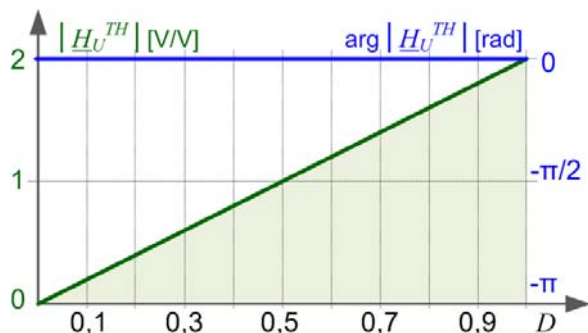


Rys.4. Idealizowana transmitancja napięciowa i faza transmitancji napięciowej TH w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D

W przypadku gdy współczynnik wypełnienia jest równy 0,5 ($D=0,5$) napięcie wyjściowe jest w przybliżeniu równe zero ($\underline{U}_{MC} \approx 0$). Dla $D > 0,5$ napięcie \underline{U}_{MC} jest w fazie z napięciem \underline{U}_S . Uwzględniając (1) i (2) napięcie obciążenia \underline{U}_L można opisać równaniem (4). Transmitancja napięciowa analizowanego TH określona jest zależnością (5), a jej geometryczna interpretacja pokazana została na rysunku 5.

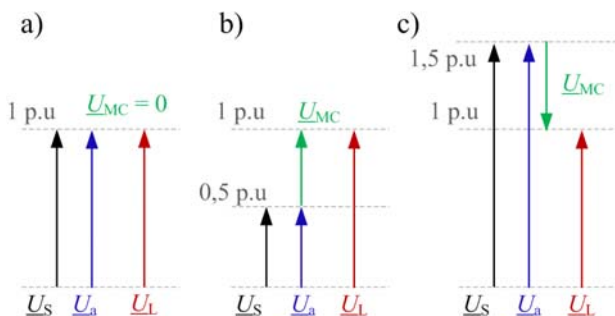
$$(4) \quad \underline{U}_L = \underline{U}_S n_b (2D - 1) + \underline{U}_S n_a$$

$$(5) \quad |H_U^{TH}| = \left| \frac{\underline{U}_L}{\underline{U}_S} \right| \cong \left| \frac{\underline{U}_S n_a (2D - 1) + \underline{U}_S n_b}{\underline{U}_S} \right| \cong |n_a (2D - 1) + n_b|$$



Rys.5. Idealizowana transmitancja napięciowa i faza transmitancji napięciowej TH w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D

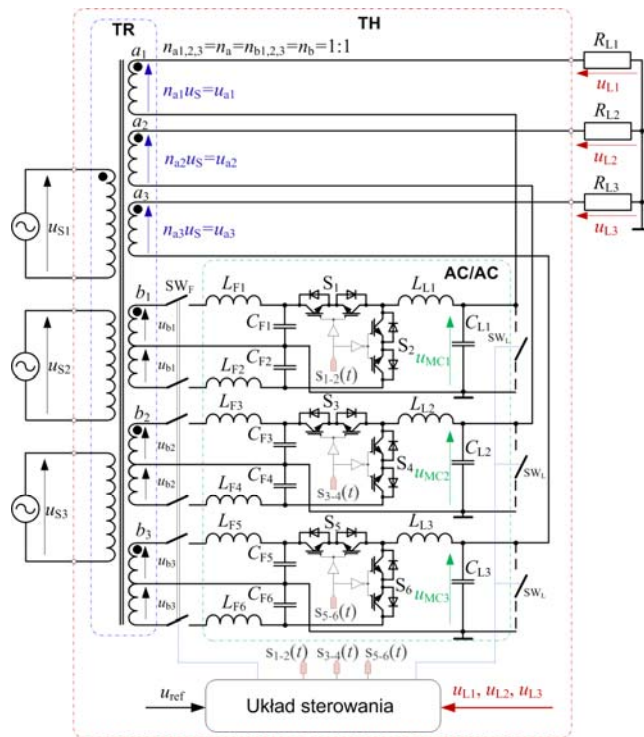
Jak pokazano na rysunku 5 napięcie wyjściowe TH (\underline{U}_L) w całym zakresie zmian D jest w fazie z napięciem wejściowym \underline{U}_S . Ponadto napięcie \underline{U}_L może osiągać wartość dwukrotnie większą od napięcia \underline{U}_S . Możliwość dwukrotnego zwiększenia napięcia wyjściowego względem wejściowego pozwala na kompensację 50% zapadu napięcia. Wykresy wskazane napięć w układzie TH z rysunku 3, pokazujące działanie układu pokazano na rysunku 6.



Rys.6. Przykładowe wykresy wskazowe w warunkach: a) nominalnych, b) 50% zapadu napięcia, c) 50% przebiecia

Pracując w warunkach znamionowych (brak wahań napięcia), napięcie dodatkowe z przekształtnika AC/AC jest w przybliżeniu równe zero ($\underline{U}_{MC} \approx 0$) (rys. 6a). W przypadku zapadu napięcia przekształtnik pracuje ze współczynnikiem wypełnienia impulsu $D > 0,5$, a napięcie \underline{U}_{MC} jest w fazie z napięciem \underline{U}_S (rys. 6b). W przypadku kompensacji przebiec, przekształtnik pracuje ze współczynnikiem $D < 0$, napięcie wyjściowe przekształtnika AC/AC \underline{U}_{MC} jest w przeciwfazie względem napięcia \underline{U}_S .

Jednofazowy transformator hybrydowy pokazany na rysunku 3 w prosty sposób można rozwinąć do topologii trójfazowej (rys. 7).



Rys.7. Trójfazowy transformator hybrydowy z dwubiegowym przekształtnikiem AC/AC

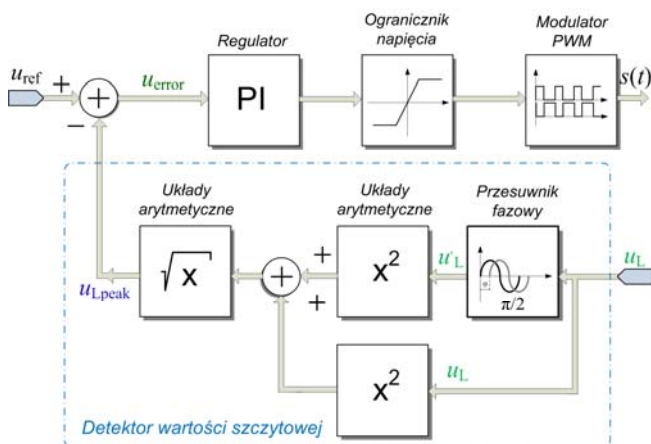
Analogicznie do układu jednofazowego TH, trójfazowy transformator TR (rys. 7) ma po dwa uzwojenia wtórne w każdej fazie: uzwojenia główne a_1, a_2, a_3 , i uzwojenia dodatkowe b_1, b_2, b_3 . Uzwojenia dodatkowe wyposażone są w centralny odczep, symetrycznie dzielący każde z uzwojeń. Każde z uzwojeń dodatkowych połączone jest przez filtr dolnoprzepustowy z przekształtnikiem AC/AC. Analogicznie do rozwiązania jednofazowego, wyjścia przekształtnika połączone są szeregowo z odpowiadającymi im uzwojeniami głównymi transformatora TR. Topologia trójfazowego TH (rys. 7) pozwala na niezależne sterowanie napięcia w każdej fazie. Pozwala to m.in. na symetryzację napięć wyjściowych. Analogicznie jak w przypadku topologii jednofazowej (rys. 3) trójfazowy przekształtnik AC/AC (rys. 7) jest sterowany za pomocą modulacji szerokości impulsu PWM. Blokowy schemat układu sterowania pokazano na rysunku 8.

Głównym elementem układu sterowania jest detektor wartości szczytowej [22] (rys. 8), realizujący funkcję opisaną zależnością (6).

$$(6) \quad u_{Lpeak} = \sqrt{(U_L \sin(\omega t))^2 + (U_L \cos(\omega t))^2},$$

gdzie u_{Lpeak} jest sygnałem wyjściowym detektora, u_L – napięcie obciążenia (sygnał wejściowy detektora wartości

szczytowej). Sygnał napięciowy u_L jest dzielony na dwa sygnały u_L i u'_L , z czego sygnał u'_L jest przesunięty w fazie o $\pi/2$ względem sygnału u_L . Wartości obu sygnałów są podnoszone do kwadratu, następnie sumowane i pierwiastkowane, zgodnie z równaniem (6). Sygnał uchybu regulacji u_{error} podawany jest na regulator PI, a następnie na modulator PWM.



Rys.8. Schemat blokowy układu sterowania

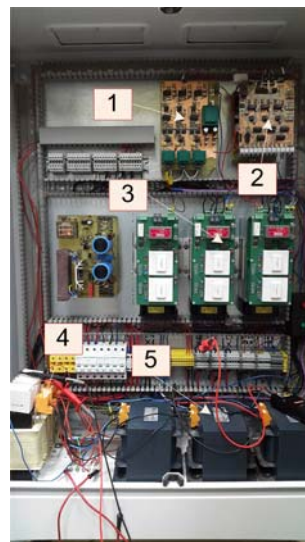
Wyniki badań eksperymentalnych

Do badań eksperymentalnych wykorzystano jednofazowy układ transformatora hybrydowego TH o mocy znamionowej 1 kVA. Podstawowe parametry modelu eksperymentalnego zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelu eksperymentalnego

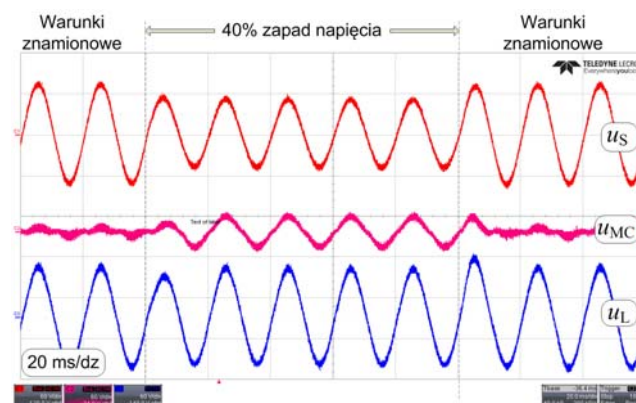
Parametr	Nazwa	Wartość	jednostka
S_N	moc znamionowa	1	kVA
U_S	napięcie zasilania	100	V_{RMS}
f	częstotliwość napięcia zasilania	50	Hz
n_a	przekładnia napięciowa	1:1	-
n_b	przekładnia napięciowa	1:1	-
L_F	indukcyjność filtra wejściowego	0,5	mH
C_F	pojemność filtra wejściowego	10	μF
L_L	indukcyjność filtra wyjściowego	0,5	mH
C_L	pojemność filtra wyjściowego	10	μF
R_L	rezystancja obciążenia	20	Ω
f_s	częstotliwość przełączania	10	kHz
S_1-S_4	moduły IGBT	SK 60 GM 123	-

Model eksperymentalny pokazano na rysunku 9. Na potrzeby badań eksperymentalnych napięcie zasilania zostało obniżone do wartości 100 V_{RMS} . Częstotliwość przełączania łączników energoelektronicznych wynosiła $f_s=10$ kHz, natomiast częstotliwość graniczna filtrów dolnoprzepustowych ustawiono na wartość ok. $\frac{1}{4}$ częstotliwości przełączania ($f_{LC}\approx\frac{1}{4}f_s$).



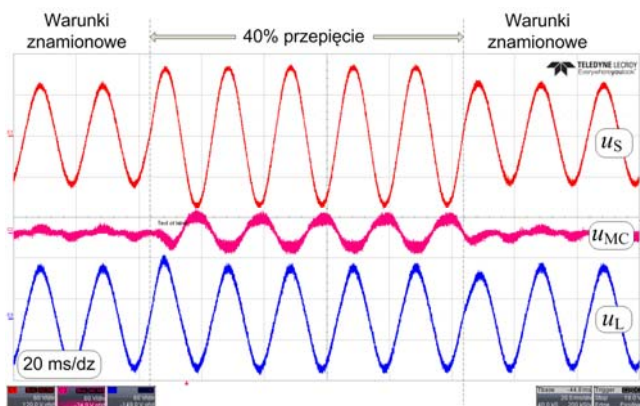
Rys.9. Widok modelu eksperymentalnego: 1 – detektor wartości szczytowej, 2 – modulator PWM, 3 – moduły z łącznikami IGBT, 4 – Filtry LC, 5 - transformatory

Na potrzeby generowania przebiegów czasowych napięć zasilania zastosowano programowalne źródło napięcia, pozwalające na generację zapadów napięcia i przebiegów o pożądanych parametrach. Podczas badań rejestrowano napięcie wejściowe u_S , wyjściowe u_L oraz napięcie dodatkowe (napięcie wyjściowe przekształtnika) u_{MC} . Przebiegi czasowe napięć podczas przebiegów, zapadów napięcia, skokowych zmian amplitudy i wahań długookresowych pokazano na rysunkach 10–14. Na rysunku 10 pokazano przebiegi czasowe napięć podczas 40% zapadu napięcia źródłowego u_S . W warunkach znamionowych (przed i po wystąpieniu zaburzenia napięcia (rys. 10)), napięcie wyjściowe przekształtnika AC/AC (u_{MC}) jest w przybliżeniu równe zero. Należy podkreślić, że w tym czasie przekształtnik pracuje ze współczynnikiem wypełnienia impulsu $D=0,5$. W czasie kompensacji zapadu napięcia, napięcie u_{MC} jest w fazie z napięciem u_S . Napięcie u_L na obciążeniu, podczas zapadu napięcia, utrzymywane jest w warunkach znamionowych. Jedynie w chwilach skokowych zmian napięcia u_S zaobserwować można krótkie stany przejściowe.



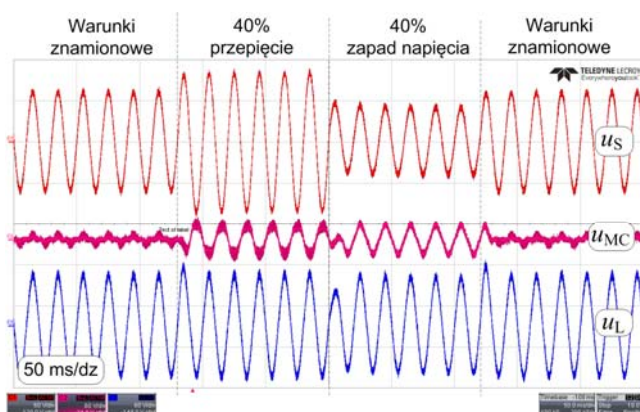
Rys.10. Przebiegi napięć w układzie TH podczas 40% zapadu napięcia zasilania

Przebiegi napięć w układzie TH podczas 40% przecięcia w napięciu zasilania u_S pokazano na rysunku 11. W porównaniu z rysunkiem 10 napięcie wyjściowe przekształtnika AC/AC u_{MC} jest w przeciwfazie z napięciem u_S .

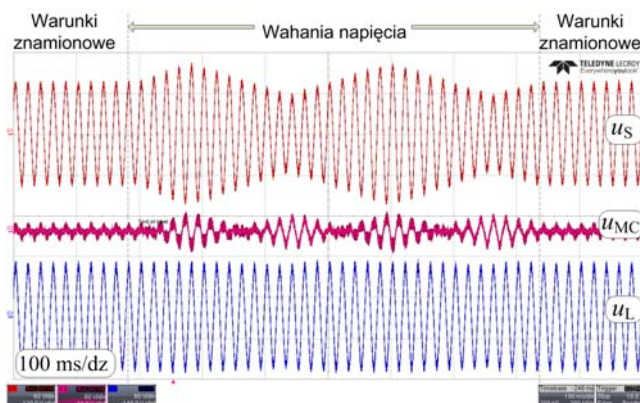


Rys.11. Przebiegi napięć w układzie TH podczas 40% przecięcia napięcia zasilania

Przebiegi napięć podczas skokowych zmian amplitudy napięcia zasilającego od wartości 140% U_S do wartości 60% U_S pokazano na rysunku 12. W ramach badań eksperymentalnych przeprowadzono również analizy pokazujące odpowiedź układu TH na długookresowe wahania napięcia (rys. 13)



Rys.12. Przebiegi napięć w układzie TH podczas skokowych zmian napięcia zasilania w zakresie +/-40%

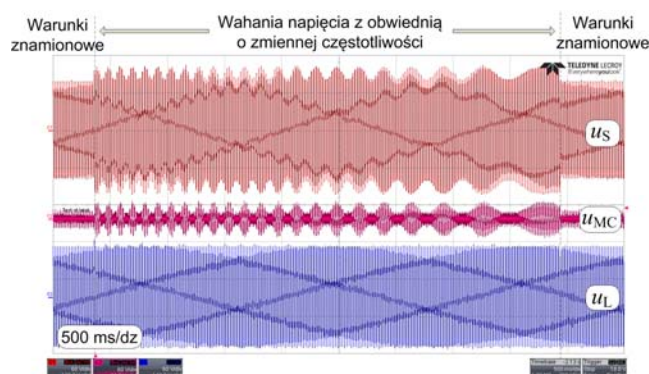


Rys.13. Przebiegi napięć w układzie TH podczas długookresowych zmian obwiedni napięcia zasilania

Amplituda napięcia obciążenia u_L utrzymywana jest na stałym poziomie, a widoczne w napięciu u_L stany przejściowe (rys. 12) podczas wystąpienia zaburzenia nie przekraczają 10ms. Krótki stan przejściowy trwający poniżej pół okresu napięcia zasilania świadczy o dobrej dynamice układu. Dynamika ta może zostać dodatkowo poprawiona przez zastosowanie bardziej zaawansowanego układu

regulacji w miejsce użytego klasycznego regulatora PI. Jak pokazano na rysunku 13 również podczas długookresowych wahań napięcia sieci u_S , amplituda napięcia obciążenia u_L utrzymuje znamionową wartość.

Układ analizowanego TH wykazuje się również dobrymi właściwościami podczas kompensacji wahań napięcia u_S o zmiennej częstotliwości obwiedni (rys. 14).



Rys.14. Przebiegi napięć w układzie TH podczas zmian obwiedni napięcia zasilania z różną częstotliwością

Pomimo oscylacji widocznych w napięciu zasilania u_S , napięcie u_L pozostaje bez zmian.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję, opis działania oraz analizę podstawowych właściwości transformatora hybrydowego (TH) z dwubiegunowym przekształtnikiem AC/AC. Badania eksperymentalne przeprowadzono na modelu laboratoryjnym o mocy znamionowej 1 kVA pracującym w zamkniętej pętli sterowania. Analizowany dwubiegunowy przekształtnik AC/AC posiada po dwa łączniki dwukierunkowe w każdej fazie. Mniejsza liczba łączników, w porównaniu z klasycznym mostkowym dwubiegunowym przekształtnikiem AC/AC, pozwala zminimalizować straty mocy w samym przekształtniku. Jednak z drugiej strony, analizowany układ wymaga zastosowania transformatora o specjalnej konstrukcji uzwojeń wtórnych (z centralnym odczepem), co można uznać za wadę. Opisany transformator hybrydowy umożliwi sterowanie napięciem wyjściowym U_L w zakresie od 0 do $2U_S$ z dość dobrą dynamiką, co pozwala na kompensację zapadów napięcia do 50% U_S i przecięć. Obok szerokiego zakresu sterowania napięciem wyjściowym, zaletą układu jest możliwość pracy TH po uszkodzeniu przekształtnika. Zwiększa to niezawodność rozwiązania i pozwala na ciągłość zasilania odbiorników z zachowaniem właściwości klasycznego transformatora elektromagnetycznego. Zaprezentowana topologia nie wymaga stosowania magazynów energii. Dodatkowo, z uwagi na bezpośrednie transformowanie napięcia AC/AC, nie wymaga synchronizacji z siecią zasilającą. Proponowany TH dedykowany jest do pracy w nowoczesnych systemach dystrybucyjnych jako alternatywa dla konwencjonalnych rozwiązań.

Badania przeprowadzono w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki o numerze referencyjnym 2015/19/D/ST7/01371.

Autorzy: dr inż. Jacek Kaniewski, E-mail: j.kaniewski@iee.uz.zgora.pl, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul.Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra

LITERATURA

- [1] PN-EN 50160 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, 2010
- [2] Honrubia-Escribano A., Gómez-Lázaro E., Molina-García A., Fuentes J.A., Influence of voltage dips on industrial equipment: Analysis and assessment, *Elect. Power and Energy Sys.*, vol. 41, (2012), 87-95
- [3] Thasananutariya T., Chatratana S., McGranaghan M., Economic Evaluation of Solution Alternatives for Voltage Sags and Momentary Interruptions, *Electrical Power Quality and Utilisation, Magazine*, vol. 1, (2005), no. 2, 17-26
- [4] Heine P., Pohjanheimo P., Lehtonen M., Lakervi E., A Method for Estimating the Frequency and Cost of Voltage Sags, *IEEE Trans. on Power System*, vol. 17, (2002), No. 2, 290–296
- [5] Shareef H., Mohamed A., Marzuki N., Analysis of personal computer ride through capability during voltage sags, *Electric Power Systems Research*, vol. 79, (2009), 1615–1624
- [6] Choi N., Li Y., Modeling and analysis of AC line conditioner based on three-phase PWM Cuk AC-AC converter, *30th Annual Conference of the IEEE Ind. Elect. Soc.*, 2-6 November 2004, Busan, Korea
- [7] Li L., Zhong Q., Novel Zeta-Mode Three-Level AC Direct Converter, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 59, (2012), No. 2, 897-903
- [8] Jain A., Joshi K., Behal A., Mohan N., Voltage Regulation With STATCOMs: Modeling, Control and Results, *IEEE Transactions on Power Deliver*, vol. 21, (2006), No. 2, 726-735
- [9] Aeloiza E. C., Enjeti P. N., Moran L. A., Pitel I., Next generation distribution transformer: to address power quality for critical load, *PESC'03*, vol. 3, (2003), 1266–2171
- [10] Kaniewski J., Fedyczak Z. and Benysek G., AC voltage sag/swell compensator based on three-phase hybrid transformer with buck-boost matrix-reactance chopper, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, (2014), Issue 8, 3835-3846
- [11] Kaniewski J., Fedyczak Z., Modelling and analysis of three-phase hybrid transformer using matrix-reactance chopper, *Przeгляд Elektrotechniczny*, no. 2, (2009), 100–105
- [12] Pinto S. F., Alcaria P., Monteiro J., Silva J. F., Matrix Converter Based Active Distribution Transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, issue 4, (2016), 1493-1501
- [13] Harada K., Anan F., Yamasaki K., Jinno M., Kawata Y., Nakashima T., Murata K., Sakamoto H., Intelligent transformer, in Proc. Power Electronics Specialists Conference, PESC '96, vol. 2, (1996), 1337–1341
- [14] Burkard J., Biela J., Evaluation of topologies and optimal design of a hybrid distribution transformer, in Proc. 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15 ECCE-Europe, Geneva, Switzerland, (2015)
- [15] Pinto S.F., Mendes P.V., Fernando Silva J., Modular Matrix Converter Based Solid State Transformer for smart grids, *Electric Power Systems Research* 136, (2016). 189–200,
- [16] Kaniewski J., Szcześniak P., Jarnut M., Benysek G., Hybrid voltage sag/swell compensator. A review of AC/AC converters, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, (2015), No 5, 37-48
- [17] Kaniewski J., Three-phase AC/AC converter for voltage sag/swell compensator and phase shifter based on Ćuk B2 matrix-reactance chopper, *Electric Power Sys. Research*, vol. 125, (2015), 203–210
- [18] Babaei E., Farhadi M. K., Sensitive load voltage compensation against voltage sags/swells and harmonics in the grid voltage and limit downstream fault currents using DVR, *Electric Power Systems Research*, vol. 83, (2012), 80– 90
- [19] Babaei E., Kangarlu M. F., Sabahi M., Compensation of voltage disturbances in distribution systems using single-phase dynamic voltage restorer, *Electric Power Systems Research*, 80 (2010) 1413–1420
- [20] Kaniewski J., Jarnut M., Szcześniak P., Fedyczak Z., The Study of Smart Distribution Transformer Based on a Bipolar Matrix Chopper, in Proc. 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, Hiszpania, (2017)
- [21] Fedyczak Z., Impulsowe układy transformujące napięcia przemienne, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, (2003)
- [22] Chu H. Y., Jou H. L., Huang C. L., Transient response of a peak voltage detector for sinusoidal signals, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 39, (1992), 74-79