

Implementacja trójfazowego transformatora hybrydowego ze sterownikiem matrycowym

Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest implementacja nowego rozwiązania trójfazowego transformatora prądu przemiennego ze sprzężeniem elektromagnetycznym i elektrycznym (hybrydowym). Sprzężenie elektromagnetyczne jest realizowane za pomocą konwencjonalnego transformatora trójfazowego (TR) z dwoma uzwojeniami wtórnymi w każdej fazie. Sprzężenie elektryczne jest realizowane za pomocą trójfazowego sterownika matrycowego (SM). W artykule przedstawiono opis działania, projekt układu, oraz wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych modelu laboratoryjnego o mocy 1 kVA, zestawione razem z wynikami badań analitycznych.

Abstract. This paper deals with the implementation of a new solution for a three-phase AC transformer with electromagnetic and electric coupling (hybrid coupling). The electromagnetic coupling is realized by means of the conventional three-phase transformer (TR) with two secondary windings in each phase. The electrical coupling is realized by means of a matrix chopper (MC), which is supplied from auxiliary secondary windings of the transformer. This paper presents an operational description of the proposed solution and simulation and experimental test results 1 kVA laboratory model collected together with theoretical analysis results. (**Implementation of a three-phase hybrid transformer using a matrix chopper.**)

Słowa kluczowe: przekształtnik prądu przemiennego, transformator hybrydowy, sterownik matrycowy.

Keywords: AC/AC converter, hybrid transformer, matrix chopper.

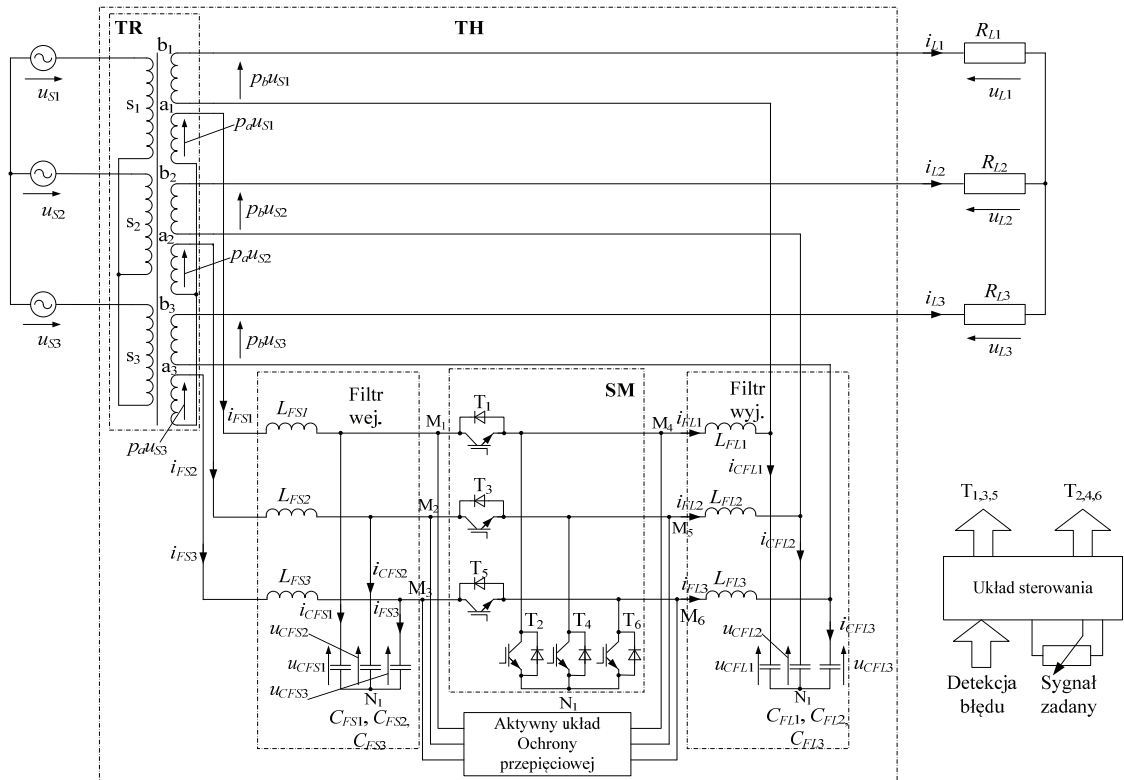
Wstęp

Wymagania dotyczące parametrów energii elektrycznej dostarczanej do odbiorcy są znane i opisane w [1]. W wyniku stanów dynamicznych występujących w systemie elektroenergetycznym, powodowanych przez zjawiska atmosferyczne, zjawiska łączeniowe, dynamiczne zmiany obciążenia, awarie, powstają u odbiorcy niekorzystne efekty w postaci niepożądanych parametrów zasilania [2], [3]. Niekorzystne warunki zasilania powodowane zapadami, spadkami napięcia i przepięciami, mają negatywny wpływ na zasilane urządzenia elektryczne. W przypadku tzw. odbiorników wrażliwych na złą jakość zasilania występuje skrócenie żywotności tych urządzeń, wadliwa praca, a nawet trwałe uszkodzenia [4], [5]. W przypadku odbiorców przemysłowych w postaci fabryk, dużych zakładów produkcyjnych, zapady napięcia i przepięcia mogą powodować duże straty finansowe [6]. Stosowanie stabilizatorów, regulatorów napięcia, układów eliminacji przepięć, pozwala na złagodzenie niepożądanych warunków zasilania [7]-[15]. Konwencjonalne układy regulacji napięcia bazują na rozwiązaniach elektromagnetycznych [16] lub tyrystorowych, gdzie odczepy, w jakie wyposażony jest transformator, załączane są poprzez styk suwaka, bądź dwukierunkowe łączniki tyrystorowe. Takie rozwiązania posiadają jednak wady, jak skokowa zmiana, niska dynamika, oddziaływania między odczepami, opisane w [17]. Wykorzystanie impulsowych układów transformowania napięć przemiennych z zastosowaniem techniki modulacji szerokości impulsu (PWM), do budowy wtórnych źródeł zasilania, eliminuje wady konwencjonalnych rozwiązań [9]. Realizację szybkich zmian napięcia wyjściowego, a tym samym dobrą dynamikę, zapewniają układy opisane w [7]-[9], [11], [14] i [15]. Zasadniczą wadą tych rozwiązań jest brak separacji galwanicznej pomiędzy źródłem zasilania a odbiornikiem. Propozycja jednofazowego „transformatora nowej generacji” została przedstawiona w pracy [13], gdzie konwencjonalny transformator jednofazowy jest połączony z jednofazowym, jednobiegunowym sterownikiem matrycowym. Szersza analiza teoretyczna tego rozwiązania została również przedstawiona w pracy [18] i rozwinięta w zakresie topologii trójfazowej [21]. Ze względu na wykorzystanie w układach opisanych w [13], [18] i [21], dwóch rodzajów sprzężenia (sprzężenie hybrydowe) – elektromagnetycznego realizowanego przez konwencjonalny transformator (TR), oraz elektrycznego realizowanego

przez sterownik matrycowy (SM), układy te nazwane zostały transformatorami hybrydowymi (TH). Niniejszy artykuł jest rozwinięciem i uzupełnieniem pracy [21] w zakresie implementacji i prezentacji eksperymentalnych wyników badań trójfazowego TH ze sterownikiem matrycowym. Opis proponowanego układu TH oraz opis jego działania przedstawiono w następnym rozdziale. W kolejnych rozdziałach zamieszczono opis obwodu głównego, parametry i obliczenia dotyczące trójfazowego transformatora (TR), filtrów wejściowego i wyjściowego, oraz aktywnego układu eliminacji przepięć komutacyjnych i układ sterowania transformatora hybrydowego. W ostatnich rozdziałach przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, oraz podsumowanie i wnioski.

Opis prezentowanego układu

Schemat ideowy układu trójfazowego transformatora hybrydowego pokazano na rysunku 1. Obwód główny TH składa się z dwóch podobwodów. Pierwszym jest trójfazowy transformator elektromagnetyczny (TR) z dwoma uzwojeniami wtórnymi w każdej fazie (a_1 - b_1 , a_2 - b_2 , a_3 - b_3). Drugim jest trójfazowy jednobiegunowy sterownik matrycowy (SM) z 3+3 łącznikami typu tranzystor-dioda [20]. Uzwojenia pierwotne TR połączone są w gwiazdę. Uzwojenia wtórne a_1 , a_2 , i a_3 , są również połączone w gwiazdę i poprzez filtr wejściowy przyłączone do zacisków wejściowych SM (M_1 , M_2 , M_3). Elementy indukcyjne filtru wejściowego nie są fizycznymi indukcyjnościami, reprezentują indukcyjność rozproszenia pary uzwojeń ($s_{1,2,3}$ - $a_{1,2,3}$) TR, widzianą od strony pierwotnej transformatora. Uzwojenia wtórne transformatora (b_1 , b_2 , b_3) są włączone szeregowo pomiędzy odpowiednie zaciski wyjściowe SM (M_4 , M_5 , M_6) i zaciski obciążenia. Do wejściowych (M_1 , M_2 , M_3) i wyjściowych (M_4 , M_5 , M_6) zacisków SM przyłączony jest aktywny układ ochrony przepięciowej, chroniący łączniki T_1 - T_6 sterownika matrycowego SM przed przepięciami komutacyjnymi. Wartość skuteczna napięcia wyjściowego (U_{L1} , U_{L2} , U_{L3}) jest algebraiczną sumą odpowiednich napięć uzwojeń wtórnych ($p_b U_{S1}$, $p_b U_{S2}$, $p_b U_{S3}$) i fazowych napięć wyjściowych SM (1) i jest zależne od wartości współczynnika wypełnienia impulsu D . Przekładnie napięciowe uzwojeń wtórnych a_1 , a_2 , a_3 oraz b_1 , b_2 , b_3 transformatora są równe odpowiednio $p_a=4/3$, $p_b=2/3$. Wartości przekładni są takie same jak w pracach [13], [18], [19] i [21].



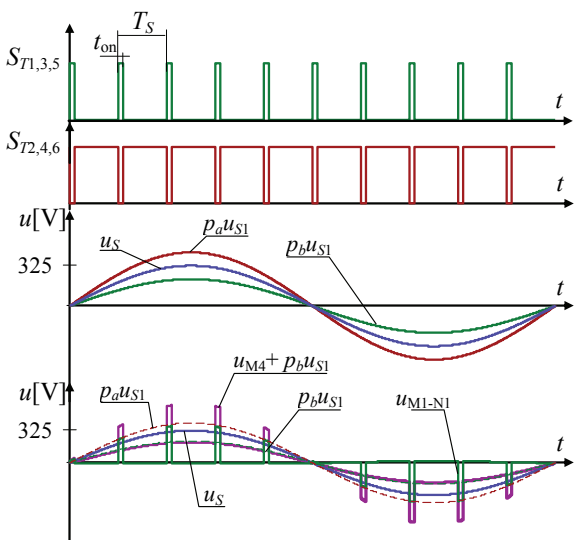
Rys.1. Schemat ideowy trójfazowego TH

$$(1) \quad U_L \cong p_a U_S D + p_b U_S$$

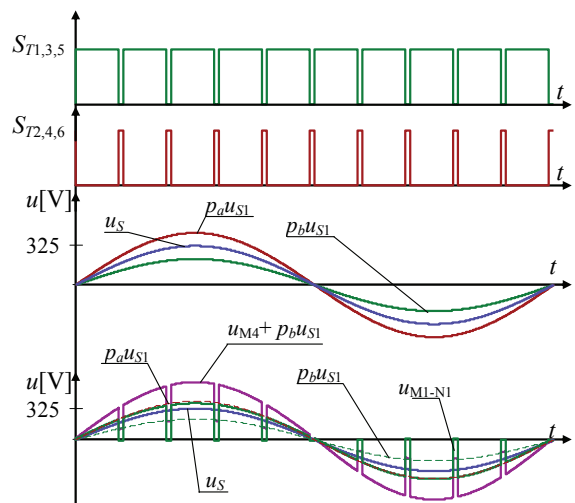
Biorąc pod uwagę (1), idealizowane wzmacnienie napięciowe TH opisane jest równaniem:

$$(2) \quad H_U^{HT} \cong \frac{U_L}{U_S} \cong \frac{p_a U_S D + p_b U_S}{U_S} \cong p_a D + p_b$$

Przykładowe idealizowane przebiegi czasowe ilustrujące działanie prezentowanego TH pokazano na rysunkach 2 i 3. Szczegółowy opis i głębsza analiza teoretyczna oparta o metodę uśrednionych zmiennych stanu, transformację d-q i model czwórnikowy została zaprezentowana w pracy [21].

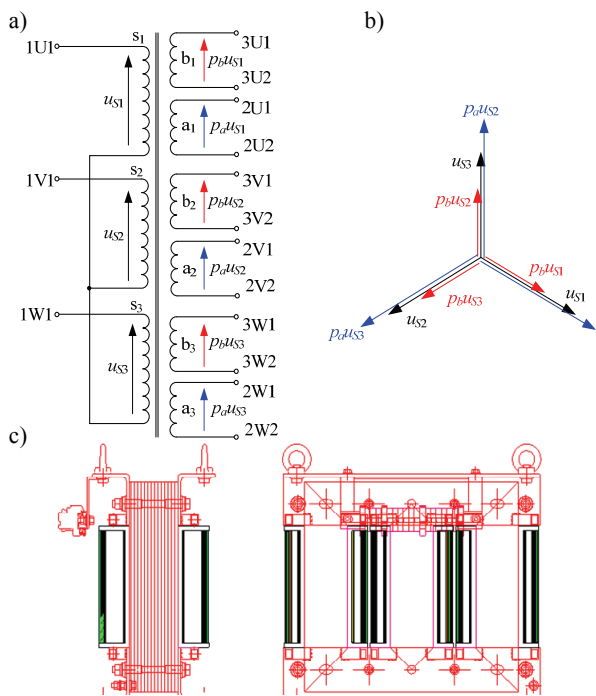


Rys.3. Idealizowane przebiegi czasowe funkcji stanu łączników oraz napięć w układzie TH przy częstotliwości przełączania $f_s=500$ Hz dla $D=0,1$



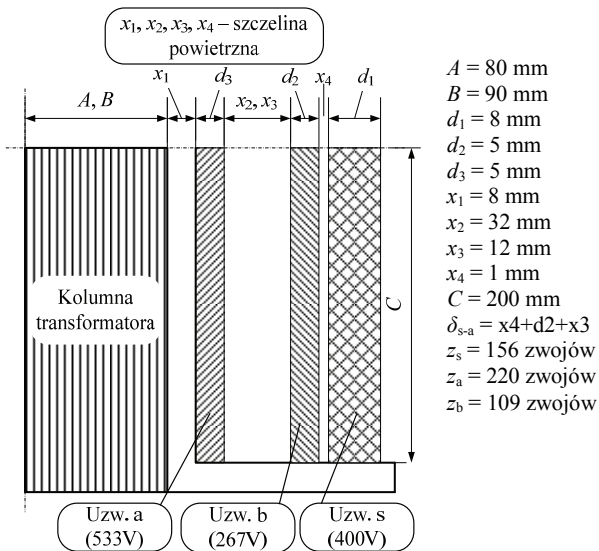
Rys.3. Idealizowane przebiegi czasowe funkcji stanu łączników oraz napięć w układzie TH przy częstotliwości przełączania $f_s=500$ Hz dla $D=0,9$

Schemat trójfazowego transformatora, wykres wskazowy napięć pierwotnych i wtórnych oraz widok konstrukcji mechanicznej został pokazany na rysunku 3. Transformator ma po dwa uzwojenia wtórne w każdej fazie (Rys. 3a). Przekładnia napięciowa uzwojeń $a_{1,2,3}$ i $b_{1,2,3}$ jest odpowiednio równa $p_a=4/3$ i $p_b=2/3$. Transformator został zaprojektowany dla specjalnych warunków pracy. Pierwszy z nich to dwa uzwojenia wtórne w każdej fazie, drugi to odpowiednie wartości przekładni napięciowych poszczególnych uzwojeń i trzeci to duża reaktancja rozproszenia pary uzwojeń $s_{1,2,3}$ i $a_{1,2,3}$. Wartości przekładni napięciowych, pozwalają na uzyskanie wzmacnienia napięciowego TH w zakresie od $0,66u_S$ do $2u_S$ [21].



Rys.3. Trójfazowy transformator, a) schemat, b) wykres wskazowy napięć transformatora, c) widok konstrukcji mechanicznej

Parametry TR są pokazane w tabeli 1. Wymiary i parametry kolumny rdzenia i uzwojeń pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Wymiary kolumny rdzenia i uzwojeń transformatora

Wykorzystanie indukcji rozproszenia jako elementu trójfazowego wejściowego filtra dolnoprzepustowego, pozwala na wyeliminowanie fizycznej indukcyjności w trójfazowym filtrze wejściowym i zmniejszenie tym samym gabarytów TH. Indukcyjność rozproszenia pary uzwojeń s-a widziana od strony uzwojenia pierwotnego określona jest równaniem (3).

$$(3) \quad L_{l(s-a)} = \frac{X_{l(s-a)}}{\omega} \cong 1,8 \text{ mH}$$

Reaktancja rozproszenia pary uzwojeń (s-a) widziana od strony pierwotnej opisana jest równaniem (4) [22], [23].

$$(4) \quad X_{l(s-a)} = 7,9 \cdot f \cdot z_s^2 \cdot \frac{1}{C_{(s-a)}} \cdot \left(\frac{d_1}{3} \cdot l_{sav} + \delta_{(s-a)} \cdot l_{\delta(s-a)} + \frac{d_3}{3} \cdot l_{aav} \right) \cdot 10^{-8} = 0,565 \Omega$$

gdzie: \$f\$ – częstotliwość napięcia zasilania, \$z_s\$ – ilość zwojów uzwojenia pierwotnego \$s_{1,2,3}\$, \$l_{sav}\$ – średnia długość zwoju uzwojenia s (5), \$l_{\delta(s-a)}\$ – średnia długość szczeliny powietrznej dla pary uzwojeń (s-a) (6), \$\delta_{(s-a)}\$ – szerokość szczeliny powietrznej między uzwojeniami (s-a) (7), \$l_{aav}\$ – średnia długość zwoju uzwojenia a (8), \$C_{(s-a)}\$ – zastępcza przeciętna długość strumienia magnetycznego (9).

$$(5) \quad l_{sav} = 2(A + 2x_1 + 2x_3 + 2x_4 + 2d_3 + 2d_2 + d_1) + 2(B + 2x_1 + 2x_2 + 2x_4 + 2d_3 + 2d_2 + d_1) = 70 \text{ cm}$$

$$(6) \quad l_{\delta(s-a)} = 2(B + 2x_1 + 2d_3 + x_3 + d_2 + x_4) + 2(A + 2x_1 + 2d_3 + x_2 + d_2 + x_4) = 55,6 \text{ cm}$$

$$(7) \quad \delta_{(s-a)} = x_4 + d_2 + x_3 = 1,8 \text{ cm}$$

$$(8) \quad l_{aav} = 2(A + 2x_1 + d_3) + 2(B + 2x_1 + d_3) = 42 \text{ cm}$$

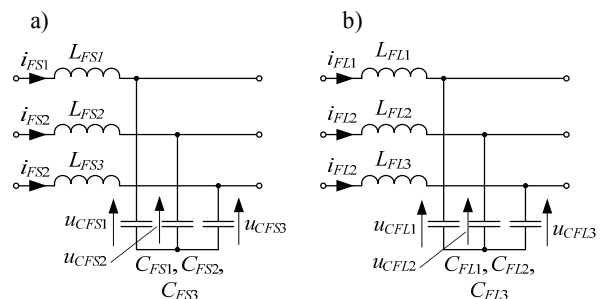
$$(9) \quad C_{(s-a)} = \frac{C}{k} = 21,4 \text{ cm}$$

gdzie \$k\$ jest to współczynnik Rogowskiego (10).

$$(10) \quad k = 1 - \frac{d_1 + d_3}{C} = 0,935$$

Indukcyjność rozproszenia (3) ma na tyle dużą wartość, że może być użyta jako element indukcyjny trójfazowego filtra wejściowego. W przybliżeniu można przyjąć, że indukcyjność filtra wejściowego wynosi połowę indukcyjności \$L_{l(s-a)}\$ (\$L_{FL} \approx 1\$ mH).

W układzie TH są stosowane dolnoprzepustowe filtry LC. Schematy ideowe filtrów wejściowego i wyjściowego prezentowanego TH zostały pokazane na rysunku 5. Filtr wejściowy (Rys. 5a) zawiera elementy LC. Indukcyjności \$L_{FL1}, L_{FL2}, L_{FL3}\$ nie są fizycznymi elementami indukcyjnymi, reprezentują one, jak już wcześniej wspomniano, indukcyjności rozproszenia.



Rys.5. Schemat filtra, a) wejściowego, b) wyjściowego

Częstotliwość graniczna filtra wejściowego i wyjściowego określona jest równaniem (11)

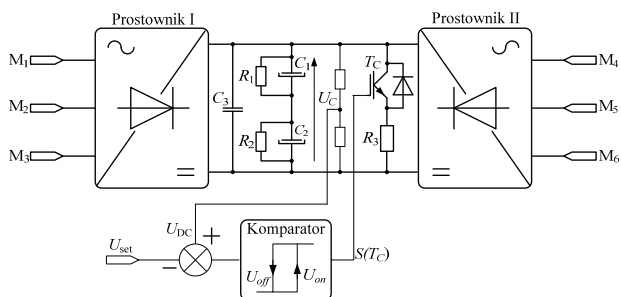
$$(11) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_F C_F}}$$

Przyjmując $1/3$ wartości częstotliwości przełączania (12) jako częstotliwość graniczną filtrów, oraz biorąc pod uwagę wartość elementów indukcyjnych, bazując na równaniu (11) określamy wartość elementów pojemnościowych filtru wejściowego i wyjściowego (tabela 1).

$$(12) \quad f_0 \cong \frac{1}{3} f_s \cdot$$

gdzie: f_s – częstotliwość przełączania (5 kHz), f_0 – częstotliwość graniczna.

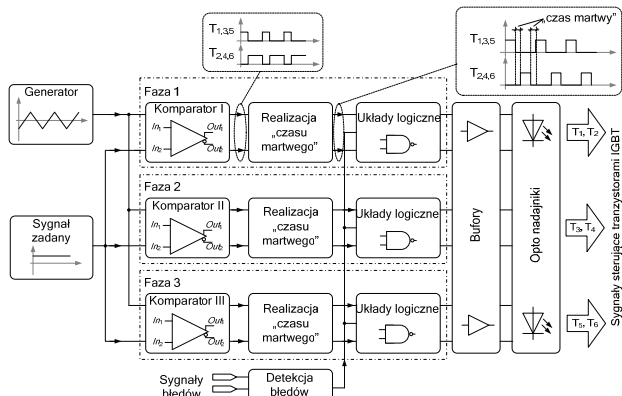
Uproszczony schemat aktywnego układu ochrony przepięciowej, chroniącego łączniki SM (T_1 - T_6) przed przepięciami komutacyjnymi, pokazano na rysunku 6 [25]. Przepięcia komutacyjne, jakie występują na łącznikach SM są efektem zastosowanej strategii sterowania modulacji szerokości impulsu (PWM) z tzw. „czasem martwym”. Przykładowe eksperymentalne przebiegi czasowe napięć w układzie ochrony przepięciowej pokazano na rysunku 9.



Rys.6. Schemat układu aktywnej ochrony przeciw przepięciowej

Układ sterowania transformatora hybrydowego

Schemat blokowy układu sterowania transformatora hybrydowego pokazano na rysunku 7.



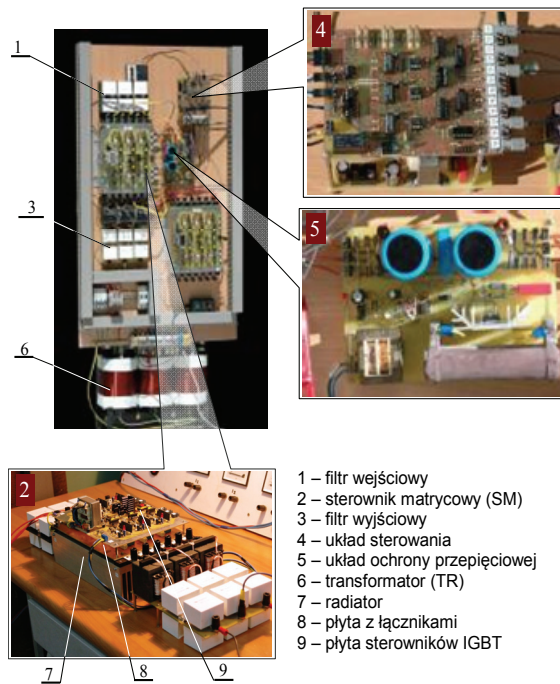
Rys.7. Schemat blokowy układu sterowania TH

Strategia sterowania TH bazuje na metodzie modulacji szerokości impulsu z „czasem martwym”. Dla układu trójfazowego z trójprzewodowym odbiornikiem, sygnały sterujące tranzystorami są jednakowe dla łączników źródła SM (T_1 , T_3 , T_5) i „odwrócone” o 180° , dla łączników obciążenia (T_2 , T_4 , T_6). Przykładowe przebiegi czasowe napięć sterujących łącznikami pokazano na rysunku 10. Rolą układu detekcji błędów jest wykrywanie stanów zwarciovych oraz nadmiernych przepięć na łącznikach SM.

Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych

Badania symulacyjne i analityczne oraz ich wyniki zostały szerzej opisane w pracy [21]. Badania symulacyjne układu transformatora hybrydowego zostały przeprowadzone za pomocą pakietu PSpice i zweryfikowane za pomocą modelu laboratoryjnego. Widok

ogólny z opisem konstrukcji mechanicznej modelu laboratoryjnego TH pokazano na rysunku 8.

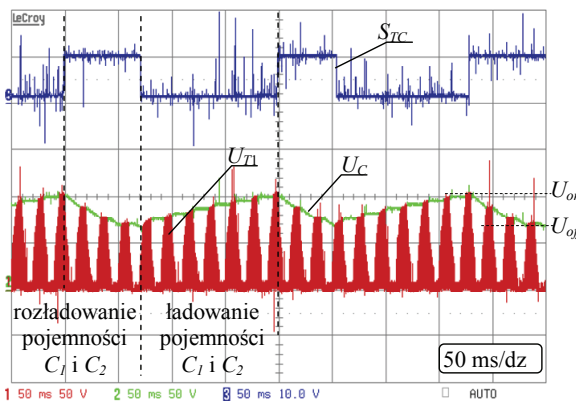


Rys.8. Widok ogólny konstrukcji mechanicznej modelu laboratoryjnego TH

Tabela 1. Parametry TH

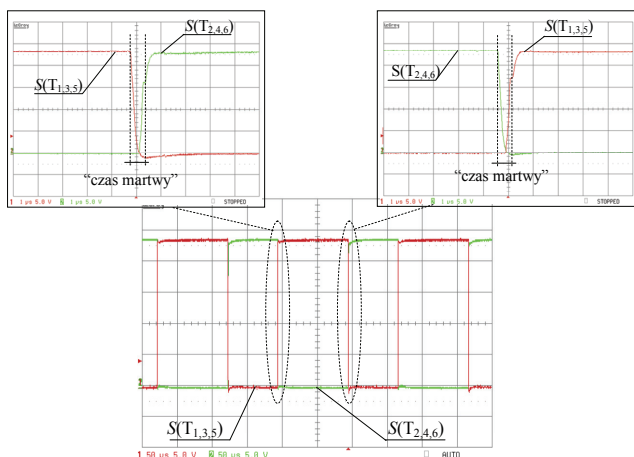
Parametr	Symbol	Wartość
Napięcie zasilania	u_s	$3 \times 50 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$
Przekładnie TR	p_a, p_b	$4/3, 2/3$
Indukcyjność filtru wej./wyj.	L_{FS}, L_{FL}	1 mH
Pojemność filtru wej./wyj.	C_{FS}, C_{FL}	$10 \mu\text{F}$
Rezystancja obciążenia	R_L	25Ω
Częstotliwość przełączania	f_s	5 kHz
„czas martwy”	t_m	$0,8 \mu\text{s}$
Tranzystory IGBT	T_1 - T_6	IRG4PH50 KD
Nap./ prąd znam. strony pierwotnej TR	U_s / I_s	$3 \times 400 \text{ V} / 15,2 \text{ A}$
Nap./ prąd znam. strony wtórnej a TR	U_a / I_a	$533 \text{ V} / 5,4 \text{ A}$
Nap./ prąd znam. strony wtórnej b TR	U_b / I_b	$267 \text{ V} / 10,8 \text{ A}$

Eksperymentalne przebiegi czasowe napięć w układzie ochrony przepięciowej zostały pokazane na rysunku 9.



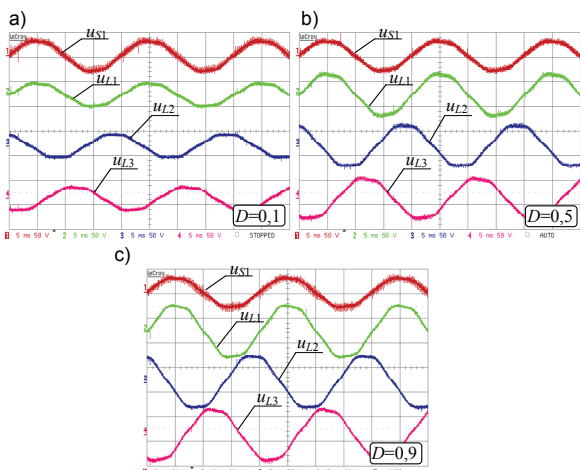
Rys.9. Eksperymentalne przebiegi czasowe napięć w układzie aktywnej ochrony przepięciowej

Eksperymentalne przebiegi czasowe sygnałów z „czasem martwym” sterujących łącznikami SM pokazano na rysunku 10.

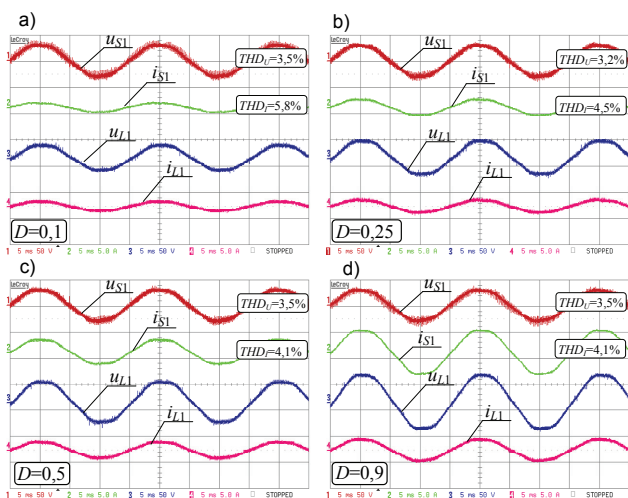


Rys. 10. Sygnały sterujące łącznikami SM

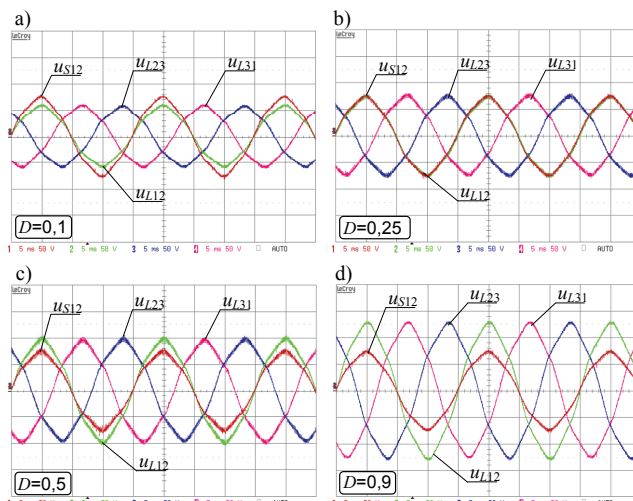
Eksperymentalne przebiegi czasowe napięć i prądów fazowych oraz napięć międzyfazowych w układzie TH dla różnych wartości współczynnika wypełnienia impulsu D pokazano na rysunkach 11–13.



Rys. 11. Przebiegi czasowe napięć fazowych w układzie TH dla różnych wartości współczynnika wypełnienia impulsu, a) $D=0,1$, b) $D=0,5$, c) $D=0,9$

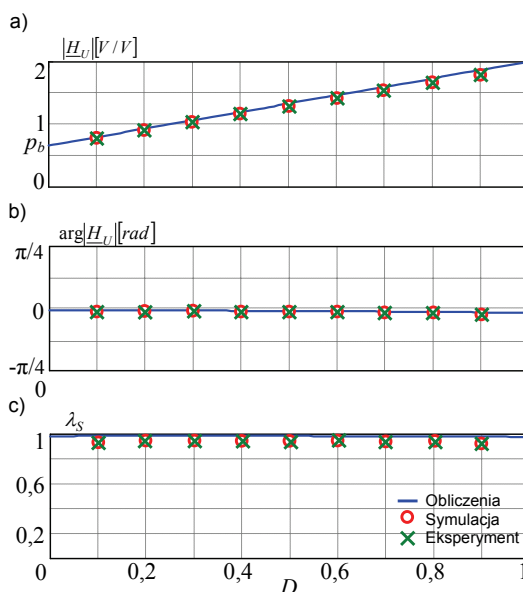


Rys. 12. Przebiegi czasowe napięć i prądów fazowych w układzie TH dla różnych wartości współczynnika wypełnienia impulsu, a) $D=0,1$, b) $D=0,25$, c) $D=0,5$, d) $D=0,9$



Rys. 13. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych w układzie TH dla różnych wartości współczynnika wypełnienia impulsu, a) $D=0,1$, b) $D=0,25$, c) $D=0,5$, d) $D=0,9$

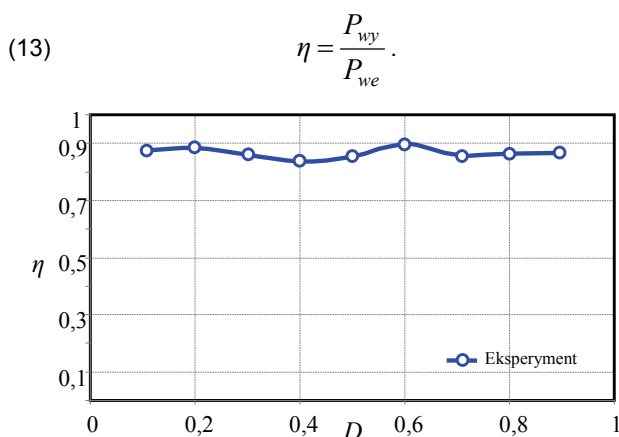
Amplituda przebiegów komutacyjnych występujących na łącznikach SM, ograniczana jest do wartości napięcia U_C w obwodzie prądu stałego układu ochrony przebiegowej (Rys. 9). Napięcie wyjściowe transformatora hybrydowego jest zależne od wartości współczynnika wypełnienia impulsu D (Rys. 11–13). Ponadto może być w sposób bezstopniowy zmieniane od wartości mniejszej od napięcia zasilania do wartości blisko dwa razy większej od napięcia zasilania - $u_L < u_S$ dla $D < 0,25$ (Rys. 13a), $u_L = u_S$ dla $D = 0,25$ (Rys. 13b), $u_L > u_S$ dla $D > 0,25$ (Rys. 13 c,d). Charakterystyki statyczne modułu transmitancji napięciowej (wzmocnienia napięciowego) i fazy oraz wejściowego współczynnika mocy w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D pokazano na rysunku 14. Wyniki badań eksperymentalnych zostały zestawione razem z wynikami badań symulacyjnych i analitycznych w celu ich weryfikacji.



Rys. 14. Charakterystyki statyczne w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D , a) modułu transmitancji napięcia, b) fazy transmitancji napięcia, c) wejściowego współczynnika mocy

Wzmocnienie napięciowe prezentowanego układu transformatora hybrydowego może być w sposób płynny zmieniane w zakresie od 0,66 do 2 (Rys 14a). Przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem wyjściowym i wejściowym (Rys. 14b) spowodowane jest właściwościami SM [20].

Charakterystykę współczynnika sprawności TH zdefiniowanego jako (13), w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D , pokazano na rysunku 15.



Rys.15. Charakterystyka współczynnika sprawności w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D

Współczynnika sprawności η , zmierzony podczas badań eksperymentalnych modelu laboratoryjnego, waha się od wartości 0,83 dla $D = 0,4$ do wartości 0,89 dla $D = 0,6$.

Podsumowanie

W artykule został przedstawiony projekt oraz wyniki badań eksperymentalnych trójfazowego transformatora hybrydowego (TH) o topologii ze sterownikiem matrycowym (SM). Wyniki badań eksperymentalnych są zbieżne z wynikami badań symulacyjnych i analitycznych. W przedstawionym TH zakres napięcia wyjściowego może być w sposób płynny zmieniany w przedziale od $0,66u_s$ do $2u_s$. Wartość napięcia wyjściowego może być utrzymywana na poziomie znamionowym nawet podczas 50% przepięć i 50% zapadów napięcia. Dalsze prace będą dotyczyły TH w układzie cztero-przewodowego oraz poprawy właściwości statycznych i dynamicznych trójfazowego transformatora hybrydowego.

Podziękowania

Transformator został zaprojektowany i wykonany przez firmę ELHAND Transformatory z Lublińca.

LITERATURA

- [1] PN-EN 50160:2002: Parameters of voltage supply in public power network (in Polish).
- [2] Conrad L., Little K., Grigg C.: Predicting and preventing problems associated with remote fault – clearing voltage dips, *IEEE Trans. on Ind. Applications*, vol. 27 No.1, 167-172 Jan./Febr. 1991.
- [3] Milanović J., Hiskansen I.: Effect of load dynamics on power system damping, *IEEE Trans. on Power System* Vol. 10 No. 2, 1022-1028, May 1995.
- [4] Djokic Z., Desment J., Vanalme G., Milanovic J., Stockman K.: Sensitivity of personal computer to voltage sags and short interruptions, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, No.1, 375 – 383, Jan. 2005.
- [5] Duran-Gomez J., Prased P., Enjeti N., Woo B.: Effect of voltage sags on adjustable-speed drives: a critical evaluation on an approach to improve performance, *IEEE Trans. on Ind. Applic.*, vol. 35, No. 6, 1440 - 1449 Nov./Dec. 1999.
- [6] Falce A., Matas G., Da Silva Y.: Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors, in Proc. 2004 *Ind. Applications Conference* 2004, vol. 4, 2573–2578, Oct.

- [7] Montero-Hernandez O., Enjeti P.: Application of a boost ac-ac converter to compensate for voltage sags in electric power distribution system,” in Proc. 2000 *IEEE 31TH Power Eng. Society Trans. and Distrib. Conf.* 470 – 475.
- [8] Oliviera J., Freitas L., Viera Jr J.: A serial regulator using soft switching PWM ac/ac full bridge converter, in Proc. 1999 *IEEE 30TH Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf.*, 193–198.
- [9] Oliviera J., Freitas L., Coelho E., Farias V., Viera Jr J.: A PWM ac/ac full bridge used like a shunt and a serial regulator, in Proc. 1997 *European Conf on Power Electr. and Applic.* Trondheim, 2.186-2.191.
- [10] Jang D., Choe G.: Step-up/down ac voltage regulator using transformer with tap changer and PWM ac chopper, *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, vol. 45 No. 6, 905-911 December 1998.
- [11] Fedyczak Z., Frąckowiak L., Jankowski M., Kempski A.: Single-phase serial ac voltage controller based on bipolar PWM ac matrix-reactance chopper, in Proc. 2005 *11TH EPE*, Dresden.
- [12] Harada K., Anan F., Yamasaki K., Jinno M., Kawata Y., Nakashima T., Murata K., Sakamoto H.: Intelligent transformer, *PESC'96 Italy* vol.2, 1337-1341 Baveno June 1996.
- [13] Aeloiza E., Enjeti P., Moran L., Pite I.: Next generation distribution transformer: to address power quality for critical loads, *PESC'03 IEEE* vol. 3, 1266 – 1271 June 2003.
- [14] Aeloiza, E. Prased P., Enjeti P., Moran L., Montero-Hernandez O., Kim S.: Analysis and design of new voltage sag compensator for critical loads in electric power distribution system. *IEEE Trans. on Ind. Applications*, vol. 39 No.4, 1143 - 1150 July / Aug. 2003.
- [15] Lee D., Habetler T., Harley R., Rostron J., Keister T.: A voltage sag supporter utilizing a PWM-switched autotransformer. *IEEE Power Elect. Spec. Conference*, PESC'04, Aachen, 2004, 4244 – 4250.
- [16] Dmowski A.: Regulacja napięć przemiennych. Układy wybrane. *WNT*, Warszawa 1983
- [17] Yorino N., Danyoshi M., Kitagawa M.: Interaction among multiple controls in tap change under load transformers, *IEEE Trans. on Power Sys.*, vol. 12, No. 1, 430-436, 1997.
- [18] Kaniewski J.: Jednofazowy transformator hybrydowy ze sterownikiem matrycowym, *Wiadomości Elektrotechniczne* 03.2006, 46-48.
- [19] Fedyczak Z., J. Kaniewski: Jednofazowy transformator hybrydowy o topologii z dwubiegunowym sterownikiem matrycowo-reakcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 07-08.2006, 80-85.
- [20] Fedyczak Z.: Impulsowe układy transformujące napięcia przemiennie, *Oficyna Wyd. Uniwer. Zielonogórskiego*, 2003.
- [21] Fedyczak Z., Kaniewski J.: Modelling and Analysis of Three-Phase Hybrid Transformer Using Matrix Converter”, in Proc. *CPE 2007*, Gdansk 2007, Poand
- [22] Jezierski E.: Transformatory podstawy teoretyczne, *WNT* Warszawa 1965
- [23] Jezierski E.: Uzwojenia transformatorów energetycznych, *WNT*, Warszawa 1982
- [24] Rząsa J.: Wybrane sposoby kształtowania przebiegów czasowych prądów wejściowych i napięć wyjściowych przekształtników matrycowych, *Rozprawa Doktorska, Politechnika Warszawska*, 2001
- [25] Fedyczak Z.: Energoelektroniczne układy sterowania mocą prądu przemiennego, Toruń 1997

Autorzy: mgr inż. Jacek Kaniewski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: J.Kaniewski@iee.uz.zgora.pl, dr hab. inż. Zbigniew Fedyczak prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul Podgórna 50 65-246 Zielona Góra, E-mail: Z.Fedyczak@iee.uz.zgora.pl, mgr inż. Mirosław Łukiewski, ELHAND Transformatory, ul. PCK 22, 42-700 Lubliniec, E-mail: m.lukiewski@elhand.pl