

Jacek KANIEWSKI<sup>1</sup>

## **JEDNOFAZOWY TRANSFORMATOR HYBRYDOWY ZE STEROWNIKIEM MATRYCOWYM**

*Przedmiotem artykułu jest transformator prądu przemiennego ze sprzężeniem elektromagnetycznym oraz elektrycznym. Sprzężenie elektromagnetyczne jest realizowane przez transformator konwencjonalny, natomiast sprzężenie elektryczne za pomocą sterownika matrycowego. W artykule zamieszczono opis transformatora hybrydowego, oraz ideę stosowania tego typu urządzeń. Analizę układu przeprowadzono za pomocą uśrednionych zmiennych stanu, weryfikując ją badaniami symulacyjnymi układu niestacjonarnego z łącznikami idealnymi.*

### **1 WPROWADZENIE**

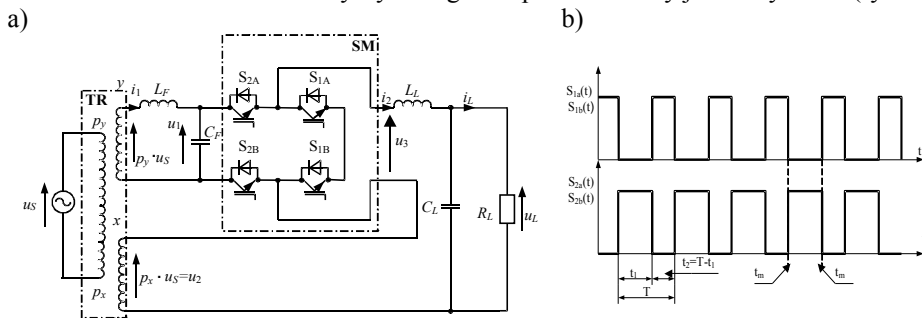
Wymagania dotyczące jakości i parametrów energii elektrycznej dostarczanej do odbiorcy są znormalizowane [1], [2]. Występowanie w systemie energetycznym stanów nieustalonych, powodowanych zwarciami, dynamicznymi zmianami obciążeń, zjawiskami łączeniowymi, wyładowaniami atmosferycznymi, wywołuje u odbiorcy niepożądany efekt w postaci pogorszenia parametrów napięcia zasilającego [3], [4]. Na odbiorniki takie jak komputery, urządzenia nadawczo – odbiorcze, aparatura medyczna, układy napędowe zasilane z przemienników częstotliwości, które są odbiornikami wrażliwymi na złą jakość napięcia zasilającego, niekorzystne warunki zasilania mają negatywny wpływ. Zapady napięcia, spadki napięcia, przepięcia, odkształcenia napięcia zasilającego, mogą prowadzić do wadliwej pracy, a nawet trwałego uszkodzenia tych odbiorników, a w przypadku obiektów przemysłowych mogą powodować znaczne straty finansowe [5] - [6]. Stosowanie stabilizatorów napięcia przemiennego, układów kompensacji spadków i zapadów napięcia, pozwala na złagodzenie efektów niekorzystnych warunków zasilania [7] – [13]. Koncepcję transformatora nowej generacji przedstawiono w pracy [11], gdzie zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Niniejszy artykuł jest rozwinięciem tej koncepcji o wyniki badań analitycznych przeprowadzonych za pomocą metody uśrednionych zmiennych stanu.

---

<sup>1</sup> Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, +48 68 328 25 38, J.Kaniewski@iee.uz.zgora.pl

## 2 OPIS PROPONOWANEGO ROZWIĄZANIA

Schemat transformatora hybrydowego TH przedstawiony jest na rysunku (rys 1a).

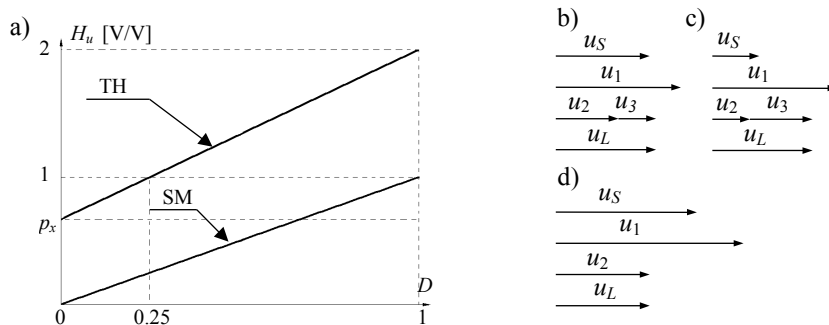


Rys.1. Transformator hybrydowy: a) schemat układu, b) przebiegi czasowe sygnałów sterujących przy sterowaniu z czasem martwym  $t_m$

Układ zawiera transformator konwencjonalny TR mający jedno uzwojenie pierwotne i dwa wydzielone uzwojenia wtórne o przeładniach  $p_x = 2/3$  i  $p_y = 4/3$ . Jedno z uzwojeń wtórnych poprzez filtr połączone jest z jednobiegunowym sterownikiem matrycowym SM. Napięcie wyjściowe TH  $u_L$  jest algebraiczną sumą napięć  $u_2$  i  $u_3$  (rys.2), które są odpowiednio napięciem indukowanym w uzwojeniu  $x$  i napięciem wyjściowym SM. Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów sterujących łączniki pokazane są na rys.1b. Transmitancje napięciowe SM oraz TH opisują idealizowane zależności (1), (2), natomiast ich interpretacja geometryczna jest pokazana na rys. 2a.

$$\underline{H}_U^{SM} = \frac{U_L}{U_1} = D. \quad (1)$$

$$\underline{H}_U^{TH} = \frac{U_L}{U_S} = p_y D + p_x. \quad (2)$$



Rys.2. Charakterystyka TH, a) idealizowane charakterystyki transmitancji napięciowej SM i TH, b) wykres wskazowy przy znamionowych warunkach  $u_s$ , c) wykres wskazowy przy 50% spadku napięcia  $u_s$ , d) wykres wskazowy przy 50% przepięciu napięcia  $u_s$ .

Zastosowanie przeładni poszczególnych uzwojeń wtórnych transformatora równych  $p_x = 2/3$  i  $p_y = 4/3$ , oraz uwzględniając charakterystykę transmitancji napięciowej SM przedstawioną na rysunku (rys. 2a), umożliwia kompensację spadków napięcia i przepięć do wartości odpowiednio 50%  $u_s$  i 150%  $u_s$  (rys. 2b,c,d). Przy znamionowych warunkach zasilania (rys. 2b), SM pracuje ze współczynnikiem wypełnienia impulsu o

wartości  $D = 0,25$ . Podczas spadku napięcia źródła zasilania (rys. 2c) SM pracuje ze współczynnikiem  $D = (0,25 - 1)$ , w zależności od głębokości spadku napięcia  $u_S$ . Natomiast podczas przebiegu, SM pracuje ze współczynnikiem  $D = (0 - 0,25)$  [11].

### 3 ANALIZA TEORETYCZNA

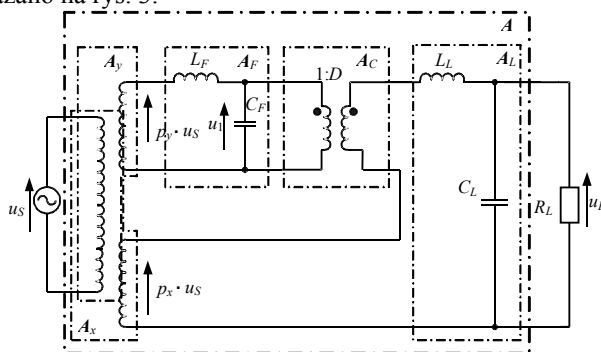
Stosując metodę uśrednionych zmiennych stanu [14], dla omawianego układu (rys. 1a) otrzymujemy:

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} \approx \mathbf{A}(D)\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}(D)u_S, \quad (3)$$

gdzie  $\dot{\bar{\mathbf{x}}} = [\dot{i}_1 \quad u_1 \quad \dot{i}_2 \quad u_L]^T$  jest wektorem uśrednionych zmiennych stanu,

$$\mathbf{A}(D) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_F} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_F} & 0 & \frac{D}{C_F} & 0 \\ 0 & \frac{D}{L_L} & 0 & \frac{1}{L_L} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_L} & -\frac{1}{R_L C_L} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}(D) = \begin{bmatrix} \frac{p_y}{L_F} \\ 0 \\ \frac{p_x}{L_L} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Na podstawie zależności (3), (4) można skonstruować uśredniony model obwodowy TH, który wraz z wyszczególnionymi czwórnikami składowymi opisanymi zależnościami (5),(6),(7) pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Uśredniony model obwodowy TH z wyszczególnionymi czwórnikami składowymi  $A_y$ ,  $A_x$ ,  $A_F$ ,  $A_C$ ,  $A_L$ ,  $A$ , są to odpowiednio macierze parametrów łańcuchowych uzwojenia  $x$  i uzwojenia  $y$  transformatora TR, filtra wejściowego SM, sterownika matrycowego SM i filtra wyjściowego SM, oraz całego obwodu transformatora hybrydowego TH

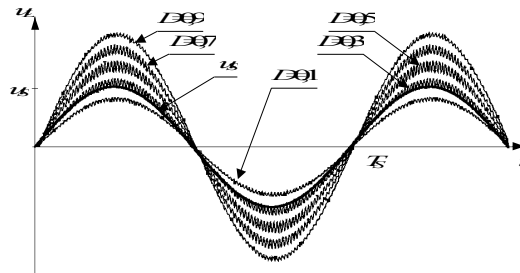
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_S \\ \underline{I}_S \end{bmatrix} = \underline{A} \begin{bmatrix} \underline{U}_L \\ \underline{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_L \\ \underline{I}_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\underline{A}_y = \begin{bmatrix} p_y & 0 \\ 0 & \frac{1}{p_y} \end{bmatrix} \quad \underline{A}_x = \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & \frac{1}{p_x} \end{bmatrix} \quad \underline{A}_F = \begin{bmatrix} 1 - \omega^2 L_F C_F & j\omega L_F \\ j\omega C_F & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\underline{A}_L = \begin{bmatrix} 1 - \omega^2 L_L C_L & j\omega L_L \\ j\omega C_L & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{A}_C = \begin{bmatrix} \frac{1}{D} & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \quad (7)$$

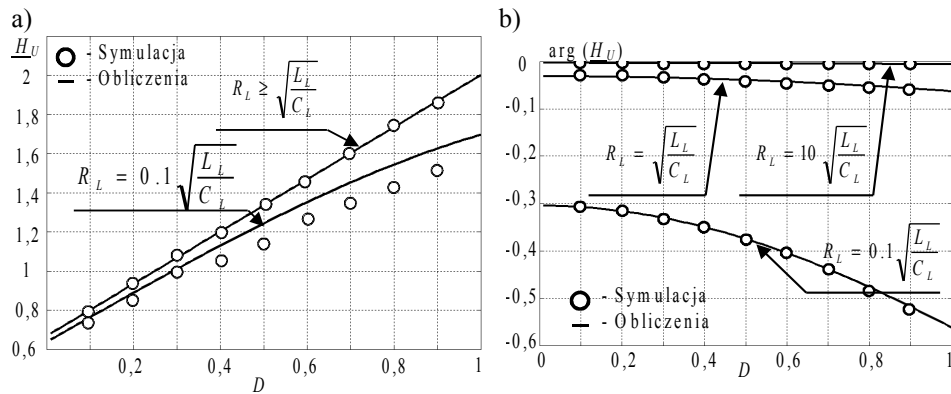
#### 4 WYNIKI ANALIZY TEORETYCZNEJ I BADAŃ SYMULACYJNYCH

Przykładowe przebiegi czasowe napięcia wyjściowego dla różnych wartości współczynnika wypełnienia impulsu  $D$  zostały pokazane na rys. 4.

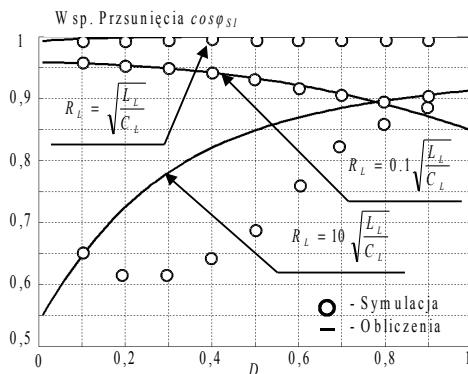


Rys. 4. Przebiegi czasowe napięcia na obciążeniu TH  $u_L$  w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu  $D$  w warunkach dopasowania

Z rys. 4 widać, że amplituda napięcia wyjściowego TH zależy od współczynnika wypełnienia impulsu  $D$ . Omawiany układ ma możliwość obniżania i podwyższania napięcia wyjściowego  $u_L$  względem napięcia wejściowego  $u_S$ . Charakterystyki transmitancji napięciowej oraz przesunięcia fazowego w warunkach dopasowania i niedopasowania obciążenia są pokazane na rys. 5. Zależności współczynnika przesunięcia  $\cos\phi_{SI}$  (współczynnika mocy) w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu  $D$  pokazano na rys. 6. Niewielkie odstępstwa pomiędzy wynikami badań analitycznych a wynikami badań symulacyjnych biorą się z zastosowania w obwodzie elementów pasywnych i zjawisk występujących pomiędzy nimi.



Rys.5 Charakterystyki a) transmitancji napięciowej dla warunków dopasowania i niedopasowania w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu, b) przesunięcia fazowego transmitancji napięciowej w warunkach dopasowania i niedopasowania odbiornika



Rys.6 Charakterystyki współczynnika mocy(przesunięcia fazowego) w warunkach dopasowania i niedopasowania impedancji odbiornika

## 5 PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono układ transformatora hybrydowego (TH) ze sterownikiem matrycowym (SM), jego opis działania oraz wyniki analizy teoretycznej i badań symulacyjnych w stanie ustalonym. Z analizy teoretycznej wynika, że możliwa jest zmiana napięcia wyjściowego TH w granicach od 0,6 do 2 napięcia zasilania  $u_S$ , co pozwala na kompensację 50% spadków napięcia, jak również 50% przepięć napięcia zasilającego. Badania symulacyjne układu niestacjonarnego z łącznikami idealnymi potwierdzają wyniki analizy teoretycznej. Z badań wynika, że niewielka podatność, jaką wykazuje układ na warunki niedopasowania, spowodowana jest występowaniem w obwodzie elementów pasywnych. Dalsze badania będą polegały na eksperymentalnej weryfikacji uzyskanych wyników analizy teoretycznej i badań symulacyjnych.

## 6 LITERATURA

1. PN-EN 50160 1998 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach zasilających.*
2. EN 6100 *Power factor correction.*
3. L. Conrad, K. Little, C. Grigg.: *Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-Clearing Voltage Dips.* IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 27 No.1, Ja/feb. 1991
4. J. V. Milanović, I. A. Hiskansen. *Effect of Load Dynamics on Power System Damping.* IEEE Transactions on Power System Vol. 10 No. 2, May 1995.
5. Z. S. Djokic, J. Desment, G. Vanalme, J.V. Milanovic, K. Stockman.: *Sensitivity of Personal Computer to Voltage Sags and Short Interruptions.* IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, No.1, January 2005
6. M. H. J. Bollen, Lidong D. Zang.: *Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable – Speed Drives for Three Phase Balanced and Unbalanced Sags.* IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 36 No.3, May / June 2000
7. O. C. Montero-Hernandez, P. Prasad, P. N. Enjeti.: *Application of a Boost AC-AC Converter to Compensate for Voltage Sags in Electric Power Distribution System.* Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31<sup>st</sup> Annual Volume 1, 18-23 June 2000 Page(s):470 - 475 vol.1
8. Joao C. Oliveira, L. C. Freitas, J. B. Viera Jr : *A serial regulator using soft switching PWM AC/AC full bridge converter* ISBN 0-7803-5421-4/99 1999 IEEE
9. Z. Fedyczak, L. Frąckowiak, M. Jankowski, A. Kempki.: *Single-phase serial AC voltage controller based on bipolar PWM AC matrix-reactance chopper.* 11th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE 2005. Dresden, 2005
10. K. Harada, F. Anan, K. Yamasaki, J. Inno, Y. Kawata, T. Nakashima, K. Murata, Hiroshi Sakamoto : *Intelligent Transformer* ISBN 0-7803-3500-7/96 IEEE 1996
11. E. Aeloiza, P. Enjeti, L. Moran, I. Pite.: *Next Generation Distribution Transformer: To Address Power Quality for Critical Loads.* ISBN 0-7803-7754-0/03 IEEE 2003
12. E. C. Aeloiza, P. Prasad, P. N. Enjeti, L. A. Moran, O. C. Montero-Hernandez, Sansung Kim.: *Analysis and Design of New Voltage Sag Compensator for Critical Loads in Electric Power Distribution System.* IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 39 No.4, July / August 2003
13. D. M. Lee, T.G. Habetler, R. G. Harley, J. Rostron, T. Keister.: *A Voltage Sag Supporter Utilizing a PWM-Switched Autotransformer.* IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC04, Aachen, 2004.
14. Z. Fedyczak *Impulsowe Układy Transformujące Napięcie* Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego 2003.

## SINGLE-PHASE HYBRID TRANSFORMER WITH MATRIX CHOPPER

This paper deals with single-phase hybrid transformer (HT) with matrix chopper (MC). There is principle of operation and results of the theoretical analysis and simulation investigations in steady in this paper. In presented solution the output voltage  $u_L$  of HT can be changes in the range from 0,6 to 2  $u_S$ . That allows for compensation of 50% sags and 50% swell of supplying voltage  $u_S$ . Simulation test results of the non-stationary circuit with ideal switches confirm results of theoretical ones. Next investigations will be focused on experimental verification of obtained results