

Wpływ efektów pasożytniczych na wybrane właściwości przetwornicy Flyback

Streszczenie. W pracy omówiono główne cechy transformatorowego przekształtnika napięcia stałego Flyback oraz znaczenie efektów pasożytniczych w jego elementach. Wyprowadzono wzory opisujące czasowe przebiegi prądów w przekształtniku w pojedynczym okresie przełączania i na ich podstawie zależności między składowymi stałymi prądów i napięć w nieidealnym przekształtniku. Pokazano przebiegi otrzymane pomiarowo i symulacyjnie ilustrujące wpływ elementów pasożytniczych na oscylacje pojawiające się przy zmianach stanu przełączników.

Abstract: The Flyback converter is the most popular example of the transformer-mode DC-DC power converter. In the standard description of Flyback the parasitic effects in its components are usually included to the very limited extent. In the paper, the influence of parasitic effects in each component of the converter is considered. The formulas describing the waveforms of currents during the single switching period of non-ideal converter are derived and used for finding the expressions for DC characteristics of the converter. The resulting expressions are verified experimentally. The influence of parasitic parameters of semiconductor switches on the waveform of oscillations observed at transients are investigated by simulations and measurements. (The influence of parasitic effects on the selected features of switch-mode Flyback converter)

Słowa kluczowe: Impulsowe przekształtniki napięcia; przetwornice transformatorowe; przetwornica Flyback; efekty pasożytnicze
Keywords: Switch mode DC-DC converters; Transformer converters; Flyback; Parasitic effects

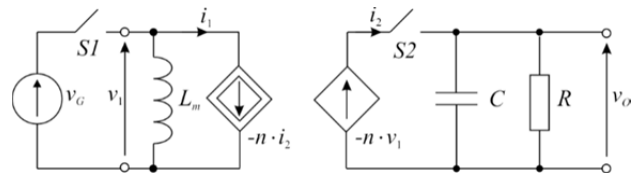
Wstęp

Przetwornica Flyback jest jednym z najbardziej popularnych, impulsowych przekształtników napięcia stałego. Jest stosowana do przetwarzania stosunkowo niewielkich mocy. Do głównych zalet tej przetwornicy należą: izolacja galwaniczna między wejściem i wyjściem, szeroki zakres możliwych wartości statycznej transmitancji napięciowej, łatwość zasilania kilku odbiorników. Jej wadą w porównaniu z innymi popularnymi typami przetwornic są dość duże oscylacje w momentach zmian stanu przełączników.

Prezentowane w literaturze modele i charakterystyki przetwornicy Flyback dotyczą zwykle przypadku idealizowanego, w którym przyjmuje się skrajnie uproszczony opis poszczególnych elementów [1], [2], [3], [4], [5]. Wyniki pomiarów charakterystyk przetwornic Flyback różnią się na ogół od wyników obliczeń opartych na modelach idealnych. Efekty pasożytnicze, będące przyczyną tych różnic, są uwzględniane w opisie tej przetwornicy w niektórych pracach w sposób częściowy (np. [6], [7], [8]). W opisie przetwornicy Flyback w pracy [9] wymieniono wszystkie istotne efekty pasożytnicze w elementach tej przetwornicy ale uwzględniono je jedynie przy określaniu strat mocy, natomiast sposób ich uwzględnienia przy wyznaczaniu statycznej transmitancji napięciowej prowadzi do wzoru, który daje wyniki liczbowe odbiegające od obserwacji eksperymentalnych. Celem niniejszej pracy jest poszerzenie opisu wpływu efektów pasożytniczych na niektóre charakterystyki przetwornicy Flyback.

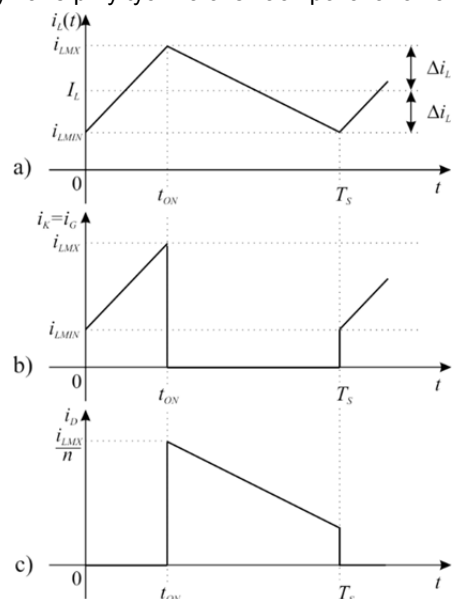
Przetwornica Flyback i efekty pasożytnicze w jej elementach

Blok główny przetwornicy Flyback pokazano na rys. 1, gdzie transformator został zastąpiony modelem obejmującym dwa źródła sterowane oraz indukcyjność magnetyzacji L_m . W czasie normalnej pracy, w trybie ciągłego przewodzenia (CCM) układ znajduje się kolejno w stanach ON ($S1$ zwarty, $S2$ rozarty) i OFF ($S1$ rozarty, $S2$ zwarty). Opisy przetwornicy idealnej odnoszą się do schematu z rysunku 1 przy założeniu, że elementy są idealne (przełączniki $S1$ i $S2$ w stanie zwarcia lub rozwarcia, pozostałe elementy schematu – liniowe i bezstratne).



Rys. 1. Schemat bloku głównego przetwornicy Flyback. Transformator zastąpiono obwodem złożonym z elementu L_m i dwóch źródeł sterowanych

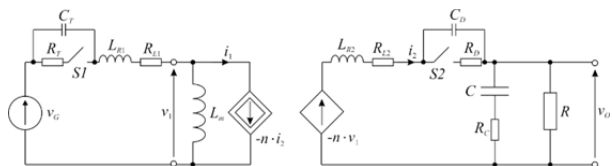
W analizie układu przetwornicy idealnej w stanie ustalonym (w którym przebiegi czasowe poszczególnych prądów i napięć powtarzają się dokładnie w kolejnych okresach) przyjmuje się dodatkowo, że wartości napięć v_G i v_o oraz współczynnika wypełnienia d_A przebiegu sterującego pozostają stałe. Czasowe przebiegi prądów w elemencie indukcyjnym L_m oraz przełącznikach $S1$ i $S2$ otrzymane przy tych założeniach pokazano na rys. 2 [1], [9].



Rys. 2. Czasowe przebiegi prądów w idealnej przetwornicy Flyback w pojedynczym okresie przełączania

Stosunek składowych stałych napięcia wyjściowego v_O i wejściowego v_G przetwornicy idealnej jest opisany wzorem:

$$(1) \quad M_{Vi} = \frac{V_O}{V_G} = \frac{n \cdot D_A}{1 - D_A}$$



Rys. 3. Schemat zastępczy przetwornicy Flyback uwzględniający efekty pasytywne

W niniejszej pracy przyjęto model przetwornicy nieidealnej pokazany na rys. 3. Założono, że poszczególne elementy stanowią połączenie elementów idealnych i pasywnych rezystancji szeregowych, a w części rozważań uwzględniono pasywności pojemności przełączników i indukcyjności rozproszenia związane z uzwojeniami transformatora. Wypadkowe rezystancje szeregowe w obwodzie pierwotnym i wtórnym oznaczono symbolami R_{TL} i R_{DL} :

$$(2) \quad R_{TL} = R_T + R_{L1}$$

$$(3) \quad R_{DL} = R_D + R_{L2}$$

Przebiegi prądów w bloku głównym w stanie ustalonym

Rozważamy czasowe przebiegi prądów w bloku głównym przetwornicy w stanie ustalonym, w obrębie okresu przełączania przyjmując dla wygody, że okres rozpoczyna się w chwili $t = 0$. Wykorzystujemy schemat zastępczy bloku głównego z rys. 3 pomijając w tej części rozważań pojemności C_T i C_D oraz indukcyjności rozproszenia L_{R1} i L_{R2} . Rezystancje pasywne elementów powodują, że napięcie na elemencie indukcyjnym L_m nie pozostaje stałe w poszczególnych fazach przełączania i w efekcie, zależności $i_L(t)$ nie są liniowe, tak jak dla przetwornicy idealnej. W fazie ON:

$$(4) \quad i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v_1 \cdot d\tau = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t (v_G - i_L(\tau) \cdot R_{TL}) \cdot d\tau$$

W celu rozwikłania zależności (4) przybliżamy przebieg $i_L(\tau)$ pod całką przez średnią arytmetyczną:

$$(5) \quad i_L(\tau) = \frac{i_L(0) + i_L(t)}{2}$$

Pozwala to na wyznaczenie przybliżonej zależności $i_L(t)$ w rozpatrywanym odcinku czasu:

$$(6) \quad i_L(t) = \frac{i_L(0) + [v_G - R_{TL} \cdot i_L(0) / 2] \cdot t / L}{1 + R_{TL} \cdot t / (2 \cdot L)} \quad \text{dla } t \in (0, t_{ON})$$

Dla drugiej fazy przełączania (stan OFF), na podstawie schematu z rys. 3, otrzymuje się:

$$(7) \quad v_1 = -\frac{v_O}{n} - \frac{i_L}{n^2} \cdot R_{DL}$$

Postępując podobnie jak dla stanu ON otrzymujemy przybliżoną zależność $i_L(t)$:

$$(8) \quad i_L(t) = \frac{i_L(t_{ON}) \cdot \left[1 - \frac{R_{DL}}{2 \cdot n^2 \cdot L} \cdot (t - t_{ON}) \right] - \frac{v_O}{n \cdot L} \cdot (t - t_{ON})}{1 + \frac{R_{DL}}{2 \cdot n^2 \cdot L} \cdot (t - t_{ON})} \quad \text{dla } t \in (t_{ON}, T_S)$$

Występującą w opisie (6), (8) wielkość $i_L(0)$ można znaleźć wykorzystując przybliżony związek:

$$(9) \quad I_L = \frac{i_L(0) + i_L(t_{ON})}{2}$$

po uprzednim wyznaczeniu składowej stałej I_L prądu w elemencie L_m .

Znajomość przebiegów $i_L(t)$ pozwala na wyznaczenie przebiegów prądu wejściowego oraz prądów przełączników w poszczególnych fazach pracy w oparciu o związki wynikające z rys. 3. Przykładowo, prąd wejściowy i prąd przełącznika $S1$ w fazie ON są równe prądowi $i_L(t)$. Prąd przełącznika $S2$ w fazie OFF wynosi:

$$(10) \quad i_{S2}(t) = \frac{i_L(t)}{n}$$

Zależności dla składowych stałych

Związek między składowymi stałymi napięć na wejściu i wyjściu przetwornicy można otrzymać z równań (6), (8) wykorzystując warunek stanu ustalonego:

$$(11) \quad i_L(T_S) = i_L(0)$$

Otrzymuje się:

$$(12) \quad V_O = \frac{\frac{n \cdot D_A}{1 - D_A}}{1 + G \cdot R_{EQ} \cdot \frac{1}{(1 - D_A)^2}} \cdot V_G = M_V \cdot V_G$$

gdzie:

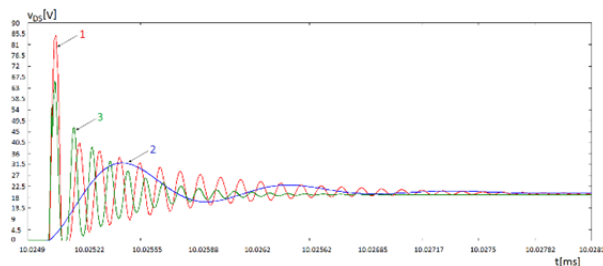
$$(13) \quad R_{EQ} = D_A \cdot R_{TL} + (1 - D_A) \cdot \frac{R_{DL}}{n^2}$$

Na podstawie rys. 3 otrzymujemy wyrażenia na składowe stałe prądu elementu L i prądu wejściowego:

$$(14) \quad I_L = \frac{n \cdot G \cdot V_O}{1 - D_A} = \frac{n \cdot G \cdot M_V \cdot V_G}{1 - D_A}$$

$$(15) \quad I_G = D_A \cdot I_L$$

Z wzorów (12) – (15) wynika między innymi, że statyczna transmitancja napięciowa M_V i prąd wejściowy I_G przy danym napięciu V_G obliczane przy uwzględnieniu rezystancji pasywnych mogą różnić się znacząco od ich wartości dla przetwornicy idealnej. W wykonanym modelu laboratoryjnym zastosowano transformator o przekładni $n = 0,2$, konduktancja obciążenia wynosiła $G = 0,33 \text{ S}$, napięcie wejściowe $V_G = 10 \text{ V}$, współczynnik wypełnienia $D_A = 0,5$, a zmierzone rezystancje pasytywne: $R_T = 0,05 \text{ } \Omega$; $R_{L1} = 0,5 \text{ } \Omega$; $R_D = 0,1 \text{ } \Omega$; $R_{L2} = 0,23 \text{ } \Omega$; Obliczone na podstawie wzorów (12), (13) napięcie wyjściowe wynosiło $V_O = 1,613 \text{ V}$, zaś jego wartość pomierzona: $1,65 \text{ V}$.



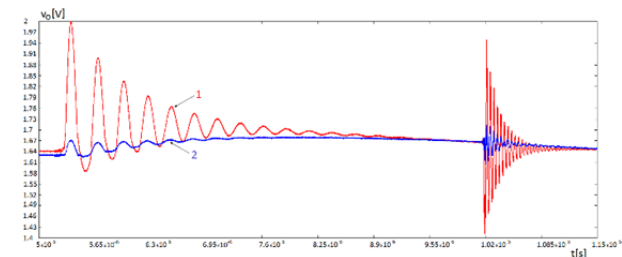
Rys. 4. Czasowe przebiegi napięcia v_{DS} : otrzymane podczas symulacji dla dwóch pojemności wyjściowych przełącznika $S1$: 100 pF (1) i 6.8 nF (2) oraz z pomiaru (3)

Stany przejściowe w trakcie przełączania

Czasowe przebiegi prądów i napięć w rzeczywistej przetwornicy Flyback różnią się od przebiegów idealizowanych, głównie w momentach przełączania. Oscylacje pojawiające się przy zmiany stanu przełączników zakłócają pracę przetwornicy, dlatego stosuje się tzw. snubbery dla ich stłumienia. Ten punkt poświęcono ocenie wpływu elementów pasywnych na przebieg oscylacji, zatem badane przetwornice nie zawierają snubberów.

Przykładowe wyniki symulacji i pomiarów stanów przejściowych pokazane na rysunkach 4 i 5, otrzymano dla przetwornic o wspólnym zestawie parametrów

podstawowych: $V_G=10V$, $R_O=3\Omega$, $f_s=100kHz$, $D_A=0.5$, $L_p=150\mu H$, $n=0.2$. Pokazane na rys. 4 przebiegi napięcia między drenem i źródłem tranzystorów służących jako przełącznik $S1$ otrzymano z symulacji dla dwóch różnych pojemności wyjściowych tranzystora oraz z pomiaru dla tranzystora o pojemności wyjściowej $C_T=68pF$. Przyjęty w symulacjach model elementu $S1$ stanowi połączenie idealnego przełącznika i rezystancji R_T oraz pojemności C_T i dodatkowego elementu stanowiącego idealne złącze p-n. Przebiegi napięcia wyjściowego przetwornicy pokazane na rys. 5 otrzymano przy zastosowaniu różnych typów kondensatorów: 1) – kondensator elektrolityczny; 2) – kondensator elektrolityczny z bocznikowanym kondensatorem ceramicznym o małym ESR.



Rys. 5. Czasowy przebieg napięcia wyjściowego v_o dla różnych wartości R_C kondensatora wyjściowego: 1) $C = 470\mu F$ i $R_C = 70m\Omega$; 2) $C = 570\mu F$ i $R_C = 2m\Omega$

Przedstawione przykłady pokazują bardzo silny wpływ pojemności wyjściowej tranzystora (przełącznik $S1$) oraz pasożytniczej rezystancji kondensatora wyjściowego na przebieg oscylacji w układzie przekształtnika Flyback.

Podsumowanie

Praca stanowi poszerzenie opisu rzeczywistych impulsowych przekształtników Flyback. Przedstawiono w niej wybrane charakterystyki przekształtnika otrzymane z pomiarów lub z obliczeń, w których uwzględniono efekty pasożytnicze w poszczególnych elementach przekształtnika. W rozdziale 3 przedstawiono wyprowadzenie przebiegów czasowych prądu elementu indukcyjnego w modelu przekształtnika, z których bezpośrednio wynikają opisy przebiegu prądu wejściowego oraz prądów w elementach przełącznikowych. Z tych zależności otrzymuje się związki dla składowych stałych pokazane w rozdziale 4 i częściowo zweryfikowane doświadczalnie. W rozdziale 5 pokazano wyniki pomiarów i symulacji czasowych przebiegów wybranych napięć w przekształtniku, w trakcie

procesów przełączania. Opisy tych przebiegów mogą posłużyć do udoskonalenia procedur projektowania bloków służących do tłumienia pasożytniczych oscylacji (tzw. snubberów).

Autorzy: prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke, Wydział Elektroniki i Informatyki, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, mgr inż. Maciej Bączek Wydział Elektroniki i Informatyki, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin dr inż. Jarosław Kraśniewski Wydział Elektroniki i Informatyki, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

LITERATURA

- [1] R.W. Erickson, D Maksimovic, „Fundamentals of Power Electronics”, 2-nd Edition, Kluwer, 2002
- [2] N. Kasundra, A. Kumar, „Design and Simulation of Flyback Converter in MATLAB using PID Controller”, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 5, Issue 2, February 2016, pp. 960-965
- [3] N. S. Jayalaksami, D. N. Gaonkar, A. Naik, „Design and Analysis of Dual Output Flyback Converter for Standalone PV/Battery System”, International Journal of Renewable Energy Research, Jayalakhshi N. S. et al., Vol.7, No.3, 2017, pp. 1032-1040
- [4] E. Wang, „Feedback Control Design of Off-line Flyback Converter”, Richtek Technology Corporation, Application Note AN017, Jun 2014
- [5] W. Kleebchampee, C. Bunlaksananusorn, „Modeling and Control Design of a Current-Mode Controlled Flyback Converter with Optocoupler Feedback”, Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005, pp.787-792
- [6] B.R. Lin, H.K. Chiang, K.C. Chen, D. Wang, „Analysis, design and implementation of an active clamp flyback converter”, Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005, pp. 424-429
- [7] A.S. Raj, A.M. Siddeshwar, K.P. Guruswamy, C.M. Maheshan, V.C. Sanekere, „Modelling of flyback converter using state space averaging technique”, Computing and Communication Technologies (CONECCT), IEEE International Conference on Electronics, 2015
- [8] S.A. Akbarabadi, H. Atighechi, J. Jatskevich, „Circuit-Averaged and State-Space-Averaged-Value Modeling of Second-Order Flyback Converter in CCM and DCM Including Conduction Losses”, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drivers, Drives Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013, pp. 995-1000
- [9] M.K. Kazimierczuk, Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, J. Wiley, 2008