

Model systemu sieć trakcyjna-pojazd do analizy zjawisk zachodzących podczas hamowania pojazdu

W artykule opisano model systemu trakcji elektrycznej prądu stałego DC: - podstacja trakcyjna, sieć trakcyjna, pojazd hamujący i pojazd pobierający energię. Model obwodu głównego pojazdu hamującego zawiera: filtr wejściowy (czwórnik LC typu „gamma”), gałąź hamowania elektrycznego składająca się z tranzystora $-T_h$ i rezystora hamowania $-R_h$, falownik napięcia $-FN$ zasilający jeden silnik asynchroniczny $-AC$ (zasilanie indywidualne). Obwód główny pojazdu pobierającego energię zamodelowano w postaci czwórnika LC i rezystancji R_{p2} o zmiennej wartości na której wydzielona jest energia pobierana przez pojazd. Na podstawie modelu matematycznego opracowano model strukturalny oparty na procedurach i oprogramowaniu narzędziowym Matlab-Simulink. Pokazano przykładowe wyniki symulacji modelu.

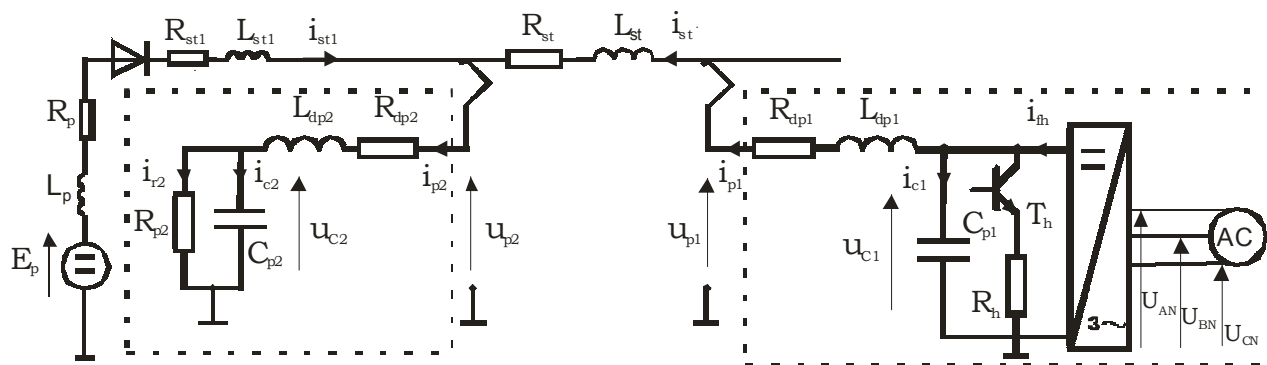
1. Wstęp

Z odzyskaniem energii podczas hamowania pojazdu w trakcji elektrycznej wiąże się nadzieje na poprawę efektywności energetycznej systemu. Towarzyszy temu jednak wiele niekorzystnych zjawisk. Powodowane rekuperacją energii wahania napięcia w sieci zależą od mocy hamowania, obciążenia aktualnego układu. Harmoniczne napięcia wnoszone przez przerywacz hamowania wywołują dodatkowe pulsacje prądu w sieci trakcyjnej oraz mogą być powodem złej pracy silników napędowych, zakłócać pracę urządzeń przytorowych. Do analizy oddziaływania pojazdu hamującego na prąd w sieci trakcyjnej przyjęto przykładowy system obejmujący: podstację trakcyjną prądu stałego, sieć trakcyjną, elektryczny pojazd trakcyjny (hamujący) oraz pojazd trakcyjny pobierający energię.

2. Model matematyczny systemu

Dla potrzeb analizy przyjęto jednostronny układ zasilania sieci trakcyjnej. Modelem zastępczym podstacji jest źródło napięcia (E_p) i szeregowo połączona

z nią rezystancja (R_p) oraz indukcyjność (L_p). W szeregu włączono diodę idealną, która odwzorowuje prostownik w podstacji trakcyjnej. Sieć trakcyjna została zamodelowana parametrami $R_{st}(l)$, $L_{st}(l)$ których wartość zależy od długości sieci trakcyjnej. Obwody główne modelowanych pojazdów składają się z czterech równolegle połączonych układów. Model obwodu głównego pojazdu hamującego zawiera: filtr wejściowy (czwórnik LC typu „gamma”), gałąź hamowania elektrycznego składająca się z tranzystora $-T_h$ i rezystora hamowania $-R_h$, falownik napięcia $-FN$ zasilający jeden silnik asynchroniczny $-AC$ (zasilanie indywidualne). Obwód główny pojazdu pobierającego energię zamodelowano w postaci czwórnika LC i rezystancji R_{p2} o zmiennej wartości na której wydzielona jest energia pobierana przez pojazd. Schemat funkcjonalny analizowanego systemu został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny uproszczonego modelu systemu trakcyjnego

Wykaz ważniejszych oznaczeń do rys. 1:

E_p - napięcie źródłowe podstacji, i_{fh} - prąd wejściowy falownika (prąd hamowania), i_{p2} - prąd pobierany przez pojazd, i_{st} - prąd w sieci trakcyjnej, u_{c1} - napięcia na kondensatorze C_{p1} , u_{c2} - napięcia na kondensatorze C_{p2} , u_{p1} , u_{p2} - odpowiednio napięcia na pantografie pojazdu hamującego i pobierającego energię, L_{dpi} , R_{dpi} , C_{pi} - odpowiednio indukcyjność, rezystancja, pojemność dławika filtru LC pojazdu ($i=1, 2$), $L_{st}(l)$ - indukcyjność sieci trakcyjnej zależnej od długości odcinka, L_p - indukcyjność zastępcza podstacji trakcyjnej, R_p - rezystancja zastępcza podstacji trakcyjnej, $R_{st}(l)$ - rezystancja sieci trakcyjnej zależnej od długości odcinka, R_{p2} - rezystancja pojazdu pobierającego energię.

2.1 Falownik napięcia

Falownik napięcia jest urządzeniem energoelektronicznym, którego właściwości statyczne i dynamiczne zależą głównie od rodzaju sterowników i typu elementów energoelektronicznych (tyrystory GTO, tranzystory IGBT) tworzących łączniki (zawory) elektryczne. Wspólną cechą tych łączników jest wynikająca z ich nieliniowości charakterystyk zdolność do pracy w dwóch stanach: *stanu przewodzenia*, w którym nawet przy bardzo dużych prądach płynących przez łącznik, spadek napięcia na nim ograniczony jest do kilku woltów oraz *stanu zaporowego*, w którym nawet przy bardzo dużych napięciach na łączniku prąd płynący przez niego nie przekracza wartości wyrażających się w miliamperach. Przyjęto opis matematyczny elektrycznego łącznika jako bezstratnego przełącznika pomiędzy dwoma stanami: stanem bezstratnego przewodzenia i stanem zaporowym. Możliwe stany łączników w trzech gałęziach falownika reprezentowane są przy pomocy zmiennych K_A , K_B , K_C . Każda z tych trzech zmiennych może przyjmować wartość 1 albo 0. Poprzez wybór odpowiedniej strategii załączania łączników mamy wpływ na właściwe kształtowanie przebiegów trójfazowych zapięć zasilających silnik zarówno co do amplitudy harmonicznej podstawowej jak i zawartości wyższych harmonicznych. Napięcia wyjściowe $U_{AN}(t)$, $U_{BN}(t)$, $U_{CN}(t)$ falownika jest wartością wynikającą z K_A , K_B , K_C oraz wartości napięcia na kondensatorze C_{p1} , opisaną wyrażeniem:

$$\begin{bmatrix} U_{AN}(t) \\ U_{BN}(t) \\ U_{CN}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_C \end{bmatrix} [u_{c1}(t)] \quad (1)$$

Każdemu układowi łączników (K_A , K_B , K_C) odpowiada ściśle określone położenie wektora przestrzennego napięcia stojana zasilającego silnik asynchroniczny. Prąd wejściowy falownika dla obwodu przedstawionego jest opisany wyrażeniem

$$i_f = i_A K_A + i_B K_B + i_C K_C \quad (2)$$

2.2 Gałąź hamowania

Gałąź hamowania lokomotywy składa się przerywacza (T_h), rezystora R_h . Sygnał K_H sterujący pracą

zaworu przekształtnika hamowania generowany jest w sterowniku hamowania i jego wartość logiczna 1 (stan przewodzenia przerywacza T_h), lub 0 (przerywacz wyłączony) uzależniona jest od wartości napięcia u_{c1} na kondensatorze C_{p1} . Gdy przerywacz jest otwarty przebieg napięcia na kondensatorze opisuje równanie różniczkowe

$$\dot{u}_{c1}(t) = \frac{i_{fh}(t)}{C_{p1}} - \frac{i_{st}}{4C_{p1}} \quad (3)$$

Liczba 4 wynika z założenia, że obwód główny lokomotywy składa się z 4 równo obciążonych identycznych układów. Napięcie na kondensatorze rośnie do wartości określonej przez u_{c1max} i gdy przekroczy wartość u_{c1max} , następuje załączenie przerywacza (T_h). Napięcie na kondensatorze zmniejsza swoją wartość i jego przebieg opisany jest równaniem

$$\dot{u}_{c1}(t) = \left(\frac{i_{fh}(t)}{C_{p1}} - \frac{u_{c1}(t)}{C_{p1}R_h} - \frac{i_{st}}{4C_{p1}} \right) \quad (4)$$

Napięcie na kondensatorze maleje C_{p1} i gdy osiągnie wartość u_{c1min} przerywacz zostaje przez układ sterowania wyłączony. Gdy przerywacz jest zamknięty i nie ma poboru energii przez inny pojazd ($i_{st}=0$), prąd z falownika (prąd hamowania) płynie przez rezystor R_h . Wynika z tego warunek na maksymalną wartość prądu hamowania.

$$i_{fh}(t) \leq \frac{u_{c1max}}{R_h} \quad (5)$$

W analizowanym systemie, podczas procesu hamowania z odzyskiem energii elektrycznej, napięcie (u_{p1}) na odbieraku pojazdu hamującego musi być większa od napięcia (u_{p2}) na odbieraku pojazdu który pobiera energię. Istotne jest również to, że napięcie u_{p1} musi być większe od napięcia jałowego podstacji. W przeciwnym przypadku mogłyby zająć warunki, które powodowałyby, że na oporniku hamowania (R_h) wydzielana byłaby energia z podstacji trakcyjnej.

2.2.1 Podstawowe parametry gałęzi hamowania

Prąd i_{fh} jest prądem odkształconym. Podstawowe parametry gałęzi hamowania można wyznaczyć dla uśrednionych wartości prądu hamownia. Wartość średniej częstotliwości pracy przerywacza (T_h). określa wyrażenie (17) [1]

$$f_{ph} = \frac{I_{sh}(U_{sh} - I_{sh}R_h)}{U_{sh}HC_{pl}} \quad (6)$$

gdzie:

$H = u_{c1max} - u_{c1min}$, U_{sh} - wartość średnia napięcia na kondensatorze C_{pl} za okres $\frac{1}{f_{ph}}$, I_{sh} - wartość średnia prądu hamowania za okres $\frac{1}{f_{ph}}$

Dla określenia związku pomiędzy częstotliwością pracy f_p przerywacza, a wartością średnią momentu hamowania silnika wykorzystamy zależność na bilans mocy określonej wyrażeniem

$$U_{sh}I_{sh} + P_{st} = M_{sh}\Omega_m \quad (7)$$

gdzie:

P_{st} - moc strat w obwodzie silnik, falownik, przerywacz hamownia,
 M_{sh} - wartość średnia elektromagnetycznego moment hamowania silnika za okres $1/f_p$

Przez P_0 okreśmy wartość mocy wydzielonej na rezystorze hamującym w trakcie cyklu hamowania.

$$P_0 = \frac{U_{sh}^2}{R_h} \quad (8)$$

Podstawiając wyrażenie (6) do (7) i uwzględniając (8) otrzymujemy zależność częstotliwości pracy przerywacza od momentu hamowania silnika.

$$f_{ph}(M_{sh}) = a_h M_{sh}^2 + b_h M_{sh} + c_h \quad (9)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \alpha_h &= \frac{1}{U_{sh}HC_{pl}}; a_h = -\alpha_h \frac{\Omega_m^2}{P_0}; \\ b_h &= \alpha_h \Omega_m \left(1 + 2 \frac{P_{st}}{P_0} \right); \\ c_h &= -\alpha_h P_{st} \left(1 + \frac{P_{st}}{P_0} \right); \end{aligned} \quad (10)$$

Maksymalna wartość częstotliwości pracy przerywacza występują dla M_{h02}

$$M_{h02} = \frac{2P_{st} + P_0}{2\Omega_m} \quad (11)$$

Maksymalna wartość częstotliwości pracy przerywacza może być również określona przez parametry gałęzi hamowania (H , C_{pl}) oraz średnią wartość napięcia na kondensatorze C_{pl} .

$$f_{ph}(M_{h02}) = f_{phmax} = \frac{U_{sh}}{4HC_{pl}R_h} \quad (12)$$

2.3 Model silnika asynchronicznego

Silnik napędowy pojazdu trakcyjnego zasilany jest napięciem odkształconym z falownika. Do opisu dynamiki maszyn indukcyjnych zasilanych napięciem odkształconym zastosowano opis silnika asynchronicznego w nieruchomym układzie współrzędnych (α , β), związanych ze stojanem. Elementy macierzy stanu są zależne od aktualnej wartości prędkości kątowej mechanicznej wirowania wału silnika Ω_m . Równania te będą miały następującą postać:

$$\dot{\mathbf{X}}_e = \mathbf{A}_e(\Omega_m)\mathbf{X}_e + \mathbf{B}_e\mathbf{U}_e \quad (13)$$

gdzie:

- macierz stanu $\mathbf{A}_e(\Omega_m)$

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_s \\ Z_2 & Z_3 & -\frac{Z_1}{\sigma_1} & -p_b\Omega_m \\ -Z_3 & Z_2 & -p_b\Omega_m & -\frac{Z_1}{\sigma_1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}; Z_1 = \left(\frac{R_s}{L_s} + \frac{R_r}{L_r} \right) \\ Z_2 &= \frac{R_r}{\sigma_1 L_r L_s}; Z_3 = \frac{p_b \Omega_m}{\sigma_1 L_s} \end{aligned} \quad (15)$$

-wektor stanu \mathbf{X}_e

$$\mathbf{X}_e = [\Psi_{s\alpha} \quad \Psi_{s\beta} \quad i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T \quad (16)$$

- macierz sterowania \mathbf{B}_e

$$\mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{\sigma_1 L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_1 L_s} \end{bmatrix} \quad (17)$$

- wektor sterowania \mathbf{U}_e

$$\mathbf{U}_e = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T \quad (18)$$

Wektor sterowania silnika \mathbf{U}_e uzależniony jest od napięcia obwodu zasilania falownika u_{cl} i od sygnałów sterujących $\mathbf{K}_{(A,B,C)}$.

$$\mathbf{U}_e = \mathbf{T}_u u_{cl} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_A \\ \mathbf{K}_B \\ \mathbf{K}_C \end{bmatrix} \quad (19)$$

Macierz \mathbf{T}_u opisuje relacje między napięciami wyjściowymi falownika a składowymi napięciami w wektorze zasilania silnika.

$$\mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} 2 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 3 & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Prądy fazowe silnika obliczamy na podstawie wyrażenia:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \mathbf{T}_p \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (21)$$

gdzie:

$$\mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Macierz \mathbf{T}_p opisuje relacje między prądami wyjściowymi falownika a składowymi prądami w wektorze stanu silnika, gdy spełniony jest warunek.

$i_A + i_B + i_C = 0$ Moment elektromagnetyczny silnika asynchronicznego określono wyrażeniem

$$M_e = \frac{p_b m_s}{2} (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (23)$$

Podstawowe parametry silnika: L_s , L_r , L_m - oznaczają indukcyjności stojana, wirnika (sprowadzoną do uzwojenia stojana) i indukcyjność wzajemną uzwojeń, R_s , R_r - oznaczają odpowiednio rezystancje

obwodu stojana i wirnika (sprowadzoną do uzwojenia stojana), m_s - liczba faz silnika, p_b - jest liczbą par biegunów silnika, Ω_m - prędkością kątową mechaniczną wirnika.

2.4 Model sieci i pojazdu pobierającego energię.

Równia różniczkowe opisujące przebieg prądu w sieci trakcyjnej oraz przebieg napięcia na kondensatorze C_{p2} (pojazd pobierający energię mają następującą postać:

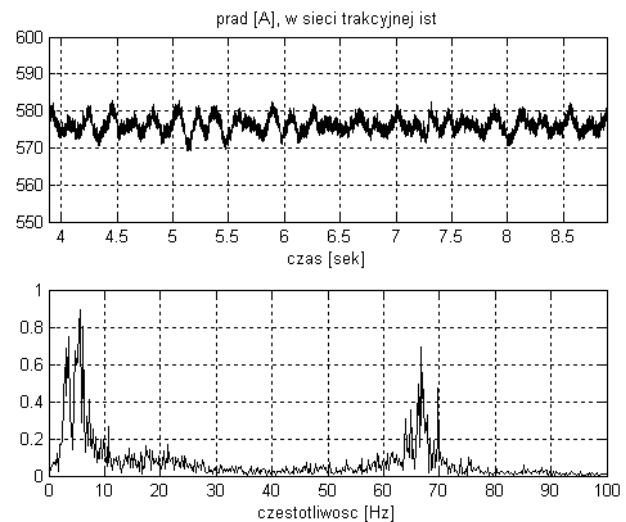
$$\begin{aligned} \dot{i}_{st} &= -\frac{R_z}{L_z} i_{st} - \frac{u_{c2}}{L_z} + \frac{u_{c1}}{L_{zt}} \\ \dot{u}_{c2} &= -\frac{u_{c2}}{C_{p2} R_{p2}} + \frac{i_{st}}{C_{p2}} \end{aligned} \quad (24)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} L_z &= L_{st}(l) + \frac{L_{dp1} + L_{dp2}}{4}; \\ R_z &= R_{st}(l) + \frac{R_{dp1} + R_{dp2}}{4} \end{aligned} \quad (25)$$

3. Wnioski

Opracowany model umożliwia oszacowanie wpływu parametrów sytemu i sterownia przerywaczem hamownia na harmoniczne prądu w sieci trakcyjnej. Na rys. 2 przedstawiono przebieg prądu w sieci trakcyjnej.



Rys. 2 a) Przebieg prądu w sieci trakcyjnej w przypadku gdy moc pojazdu hamującego jest większa od mocy pojazdu pobierającego energię, b) widmo harmonicznych prądu w sieci trakcyjnej

Dokonując zmian poszczególnych parametrów sytemu np. mocy z jaką hamuje pojazd, mocy pobieranej przez pojazd na trasie, filtru LC pojazdu, histerezy zmian napięcia na wejściu falownika, wartości rezystancji w gałęzi hamowania możemy

analizować ich wpływ na wartość harmoniczných prądu sieci trakcyjnej. Zmiany napięcia na wejściu falownika (u_{cp1}) wywołane na skutek pracy przerywacza hamowania wpływają na jakość napięcia zasilania silnika asynchronicznego. Przekłada to się na dodatkowe odkształcenia prądu i momentu silnika asynchronicznego [1, 3].

4. Literatura

- [1] Lewandowski M.: *Wpływ pulsacji napięcia obwodu pośredniczącego na napięcie wyjściowe falownika. Materiały Konferencyjne. VI Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej. Semtrak 94. Politechnika Krakowska, Zakopane, 1994.*
- [2] Lewandowski M.: *Analiza pracy układu hamowania lokomotywy z silnikiem asynchronicznym. X Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i II szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie. Semtrak 2002, Zakopane, 2002.*
- [3] Skarpetowski G., Zajac W.: *Symulacja odcinka linii kolejowej o złożonym obciążeniu konwencjonalno-przekształtnikowym. 8th Int. Conf. Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe. Warsaw 2007.*