

Piotr Drozdowski, Arkadiusz Duda

Podstacje trakcyjne prądu stałego z rekuperacją energii hamowania pojazdów

W niniejszym artykule zaprezentowano układy przekształtnikowe podstacji trakcyjnych z rekuperacją energii hamowania odzyskowego pojazdów, tj. układ podstawowy z impulsowym falownikiem rekuperacyjnym, w pełni sterowany układ z prostownikiem tyrystorowym i falownikiem impulsowym, układ z mostkiem tyrystorowym pracującym jako falownik i szeregowymi tyrystorami odcinającymi oraz układ z mostkiem tyrystorowym pracującym jako falownik i równoległymi tyrystorami odcinającymi. Wskazano na wady i zalety omawianych rozwiązań oraz przedstawiono metoda uproszczonego obliczenia bilansu energetycznego jazdy i hamowania odzyskowego pojazdu.

Linie trakcyjne prądu stałego są standardowo zasilane za pomocą podstacji trakcyjnej złożonej głównie z trójfazowego transformatora obniżającego napięcie i prostownika diodowego. Układ taki występuje na rys. 1.

Współczesne pojazdy trakcyjne są zwykle napędzane za pomocą silników indukcyjnych klatkowych zasilanych z falowników napięcia dołączonych bezpośrednio do sieci trakcyjnej prądu stałego z pośredniczącym kondensatorem. Z punktu widzenia sieci trakcyjnej podobnie zachowują się napędy z silnikami prądu stałego zasilane za pomocą przekształtników impulsowych (przerwywaczy napięcia). Podczas hamowania elektrycznego energia kinetyczna pojazdu jest zamieniana na elektryczną i przekazywana przez przekształtnik pojazdu do obwodu prądu stałego, czyli linii zasilającej. Aby zachodziło w pełni kontrolowane hamowanie energia ta musi być całkowicie zużytkowana. Może być ona pobrana przez inne pojazdy na zasilanie napędu lub na cele

grzewcze (hamowanie dynamiczne), albo może być przesłana do sieci elektroenergetycznej prądu przemiennego za pomocą przekształtnika rekuperacyjnego podstacji pracującego jako falownik (hamowanie odzyskowe). Układy umożliwiające odzysk energii do sieci trójfazowej są przedmiotem niniejszej pracy. Można dodać, że za pomocą hamowania odzyskowego można w pełni kontrolować proces hamowania, aż do zatrzymania pojazdu, odzyskując przy tym energię i oszczędzając klocki hamulcowe.

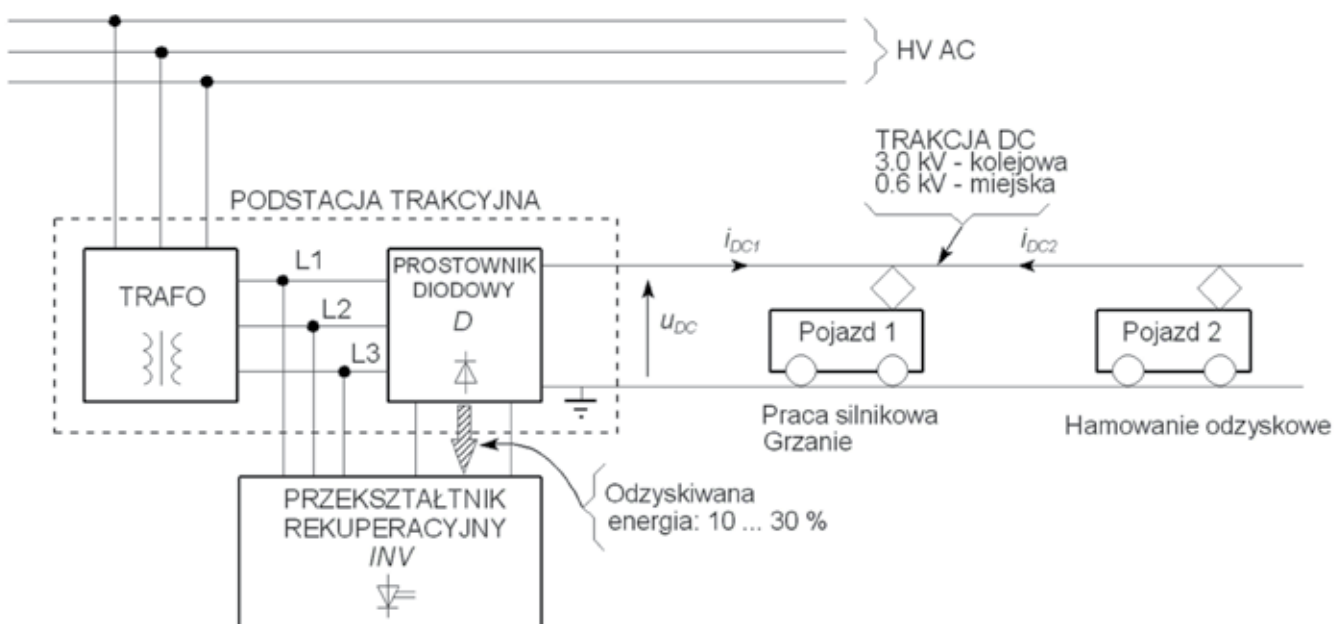
Analiza uproszczona jazdy i hamowania odzyskowego pojazdu

W celu oszacowania rozkładu mocy, napięć i prądów w sieci trakcyjnej podczas jazdy pojazdu trakcyjnego można posłużyć się modelem uproszczonym przedstawionym na rys. 2, w którym występują uśrednione chwilowe prądy i napięcia (pomija się składowe tętniące przekształtników).

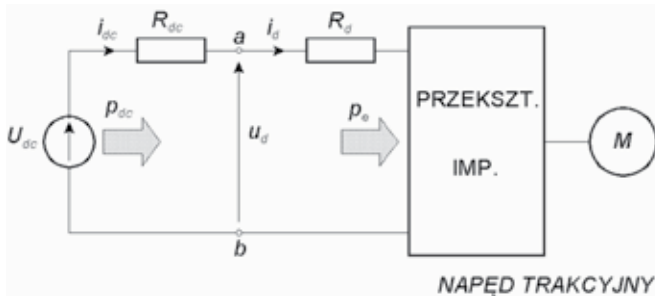
Analizie poddano pracę układu zasilania i pojazdu w funkcji czasu przy założonym przebiegu v jego prędkości. Przyjęto pojazd miejski o masie $m = 20$ t zasilany napięciem trakcyjnym $U_{dc} = 600$ V, o oporach ruchu przybliżonych funkcją $F_m = K_1 v + K_2 \operatorname{sgn}(v) v^2$, gdzie $K_1 = 52$ Ns/m, $K_2 = 7,5$ Ns²/m² przy prędkości v wyrażonej w m/s. Rezystancje: $R_{dc} = 0,5$ Ω , $R_d = 0,01$ Ω . Przebiegi wyrażono w jednostkach względnych przy bazowych wielkościach odniesienia $U^\circ = U_{dc}$ V, $P^\circ = 200$ kW, $V^\circ = 100/3,6$ m/s, $F^\circ = P^\circ / V^\circ$ N, $I^\circ = P^\circ / U^\circ$ A.

Dla zadanego przebiegu czasowego prędkości v oblicza się kolejno:

- ♦ przebieg pochodnej prędkości $\frac{dv}{dt}$,
- ♦ przebiegi siły dynamicznej pojazdu $F_d = m \frac{dv}{dt}$, siły oporów ruchu pojazdu F_m , siły napędowej pojazdu $F_e = F_d + F_m$,



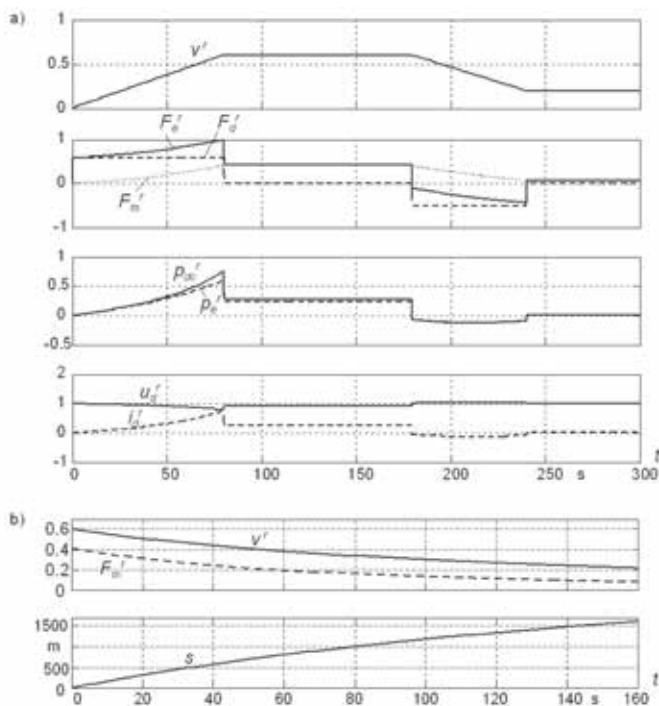
Rys. 1. Układ ideowy podstacji trakcyjnej z przekształtnikiem przekazującym energię hamowania pojazdów do sieci trójfazowej



Rys. 2. Model zastępczy zasilania pojazdu trakcyjnego, gdzie: U_{dc} – nawrotne źródło napięcia podstacji z przekształtnikiem rekuperacyjnym, R_{dc} – rezystancja linii zasilającej (0,25 Ω /km), R_d – zastępcza rezystancja wewnętrzna przekształtników zasilających silniki pojazdu, p_{dc} – moc chwilowa pobrana z podstacji, p_e – moc chwilowa elektryczna pobrana przez przekształtnik, u_d – napięcie na przekształtniku pojazdu.

- ♦ przebieg mocy elektrycznej pojazdu $p_e = F_e v$ (przy pominięciu strat elektrycznych mocy w silniku i w układzie mechanicznym moc ta jest równa mocy mechanicznej napędzającej pojazd),
- ♦ prąd zasilania silnika $i_d = \frac{U_{dc} - \sqrt{U_{DC}^2 - 4(R_{dc} + R_d)p_e}}{2(R_{dc} + R_d)}$
na podstawie $i_d = \frac{U_{dc} - \frac{p_e}{v}}{R_{dc} + R_d}$,
- ♦ przebieg mocy pobranej z podstacji $p_{dc} = U_{dc} i_d$,
- ♦ przebieg napięcia zasilającego przekształtnik pojazdu $u_d = U_{dc} - R_{dc} i_d$.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3a. Za pomocą przedstawionej metodyki można analizować rozplyw energii przy kilku pojazdach na linii i innych odbiorach trakcyjnych.



Rys. 3. Przebiegi jazdy miejskiego pojazdu elektrycznego: a) dla zadanej prędkości przejazdu, b) podczas wybiegu od prędkości względnej 0,6 do 0,2

Na rys. 3b przedstawiono przebieg prędkości pojazdu poruszającego się wybiegiem od prędkości początkowej $V_1' = 0,6$, osiągniętej po rozruchu, do końcowej $V_2' = 0,2$ takiej, jaką osiąga pojazd w pierwszym przypadku po hamowaniu odzyskowym. Przypadek ten jest opisany równaniem różniczkowym: $\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{m} F_m$.

W pierwszym przypadku pojazd przebywa drogę $s_1 = 2\ 166$ m. W drugim drogę $s_2 = 1\ 600$ m, a więc aby osiągnąć drogę s_1 musi jechać z prędkością V_2' dodatkowo $\Delta s = 566$ m, pobierając energię elektryczną. Uwzględniając jazdę silnikową i hamowanie odzyskowe, bilans zużytej energii w pierwszym przypadku wynosi $E_1' = 18$. W drugim przypadku, podczas jazdy wybiegiem, pojazd nie pobiera energii z sieci trakcyjnej i pobiera ją na odcinku Δs . W efekcie zużyta energia elektryczna wynosi $E_2' = 2$. Z punktu widzenia zużycia energii sposób drugiej jazdy jest korzystny, ale czas przejazdu jest o 100 s dłuższy, czyli czas przejazdu w pierwszym przypadku stanowi 61% czasu przejazdu w przypadku drugim. Jazda wybiegiem na krótszych odcinkach spowoduje, że będzie musiało być zastosowane hamowanie odzyskowe, co stanowi sposób najlepszy z punktu widzenia zużycia energii.

Układy przekształtnikowe podstacji trakcyjnych

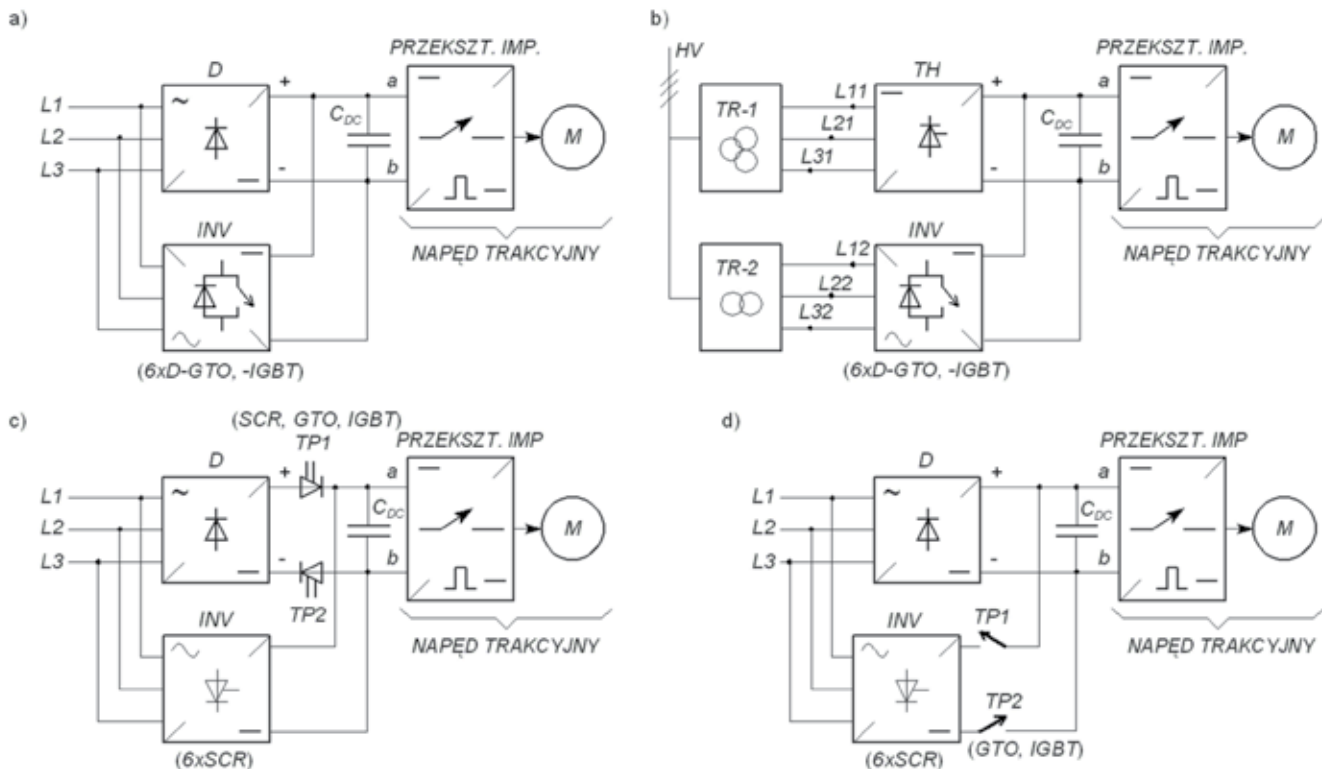
Na rys. 4 przedstawiono 4 układy przekształtnikowe podstacji trakcyjnych umożliwiające rekuperację energii hamowania pojazdów zasilanych przekształtnikami impulsowymi do sieci elektroenergetycznej prądu przemiennego.

W układzie z rys. 4a zastosowano falownik napięcia INV zbudowany na tranzystorach IGBT lub tyrystorach GTO. Bocznikuje on prostownik trakcyjny D , umożliwiając oddawanie energii do sieci trójfazowej wówczas, gdy napięcie na zaciskach podstacji wzrośnie powyżej napięcia jałowego prostownika D . Jest to rozwiązanie klasyczne, gdzie diody mostka D są równolegle dołączone do diod zwrotnych falownika. Aby umożliwić maksymalny zwrot energii do sieci trójfazowej zawory $S1, S2, \dots, S6$ falownika z rys. 5a muszą być sterowane jednopulsowo zgodnie z diagramem podawania sygnałów zero-jedynkowych q_1, q_2, \dots, q_6 przedstawionym na rys. 5b. Sygnał qTP nie jest w tym przypadku wykorzystywany.

Przebiegi ilustrujące pracę tego układu przedstawiono na rys. 6 dla testowego napędu małej mocy z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Przedstawiono przebiegi prędkości ω silnika i momentu elektromagnetycznego T_e , aby zaznaczyć stan pracy napędu. Podczas hamowania odzyskowego prąd i_d obwodu pośredniczącego prądu stałego staje się ujemny, zasilając falownik, a napięcie u_d praktycznie nie zmienia wartości średniej. Prąd fazowy i_{L1} sieci trójfazowej jest znacznie odkształcony od sinusoidy (podobnie prądy pozostałych faz), podczas gdy napięcie fazowe u_{L1} mierzone na sztucznym zerze jest sinusoidalne. Układ o tej strukturze jest w ofercie firmy ABB jako zmodernizowana podstacja trakcyjna [1].

Układ z rys. 4b jest podobny do układu poprzedniego. Poprzez zastosowanie prostownika tyrystorowego i falownika sterowanego metodą PWM może on pracować dodatkowo jako filtr aktywny. Jest oferowany przez Secheron [8] jako nowa podstacja lub modernizacja istniejącej. W drugim przypadku kompletny układ falownika z transformatorem bocznikuje istniejącą podstację. Dla podstacji kolejowych zamiast IGBT stosowane są tyrystory.

Układ przedstawiony na rys. 4c [3] jest propozycją modernizacji istniejących podstacji trakcyjnych. Rolę falownika INV pełni trójfazowy mostek z tyrystorami SCR. Umożliwia to wykorzysta-

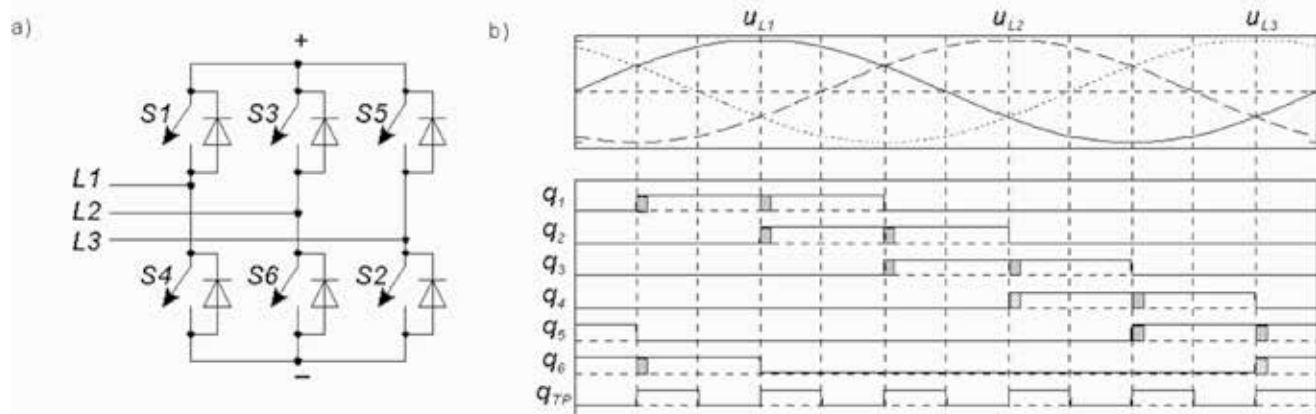


Rys. 4. Układy przekształtnikowe podstacji trakcyjnych z rekuperacją energii hamowania odzyskowego pojazdów: a) podstawowy z impulsowym falownikiem rekuperacyjnym, b) w pełni sterowany z prostownikiem tyrystorowym i falownikiem impulsowym, c) z mostkiem tyrystorowym pracującym jako falownik i szeregowymi tyrystorami odcinającymi, d) z mostkiem tyrystorowym pracującym jako falownik i równoległymi tyrystorami odcinającymi

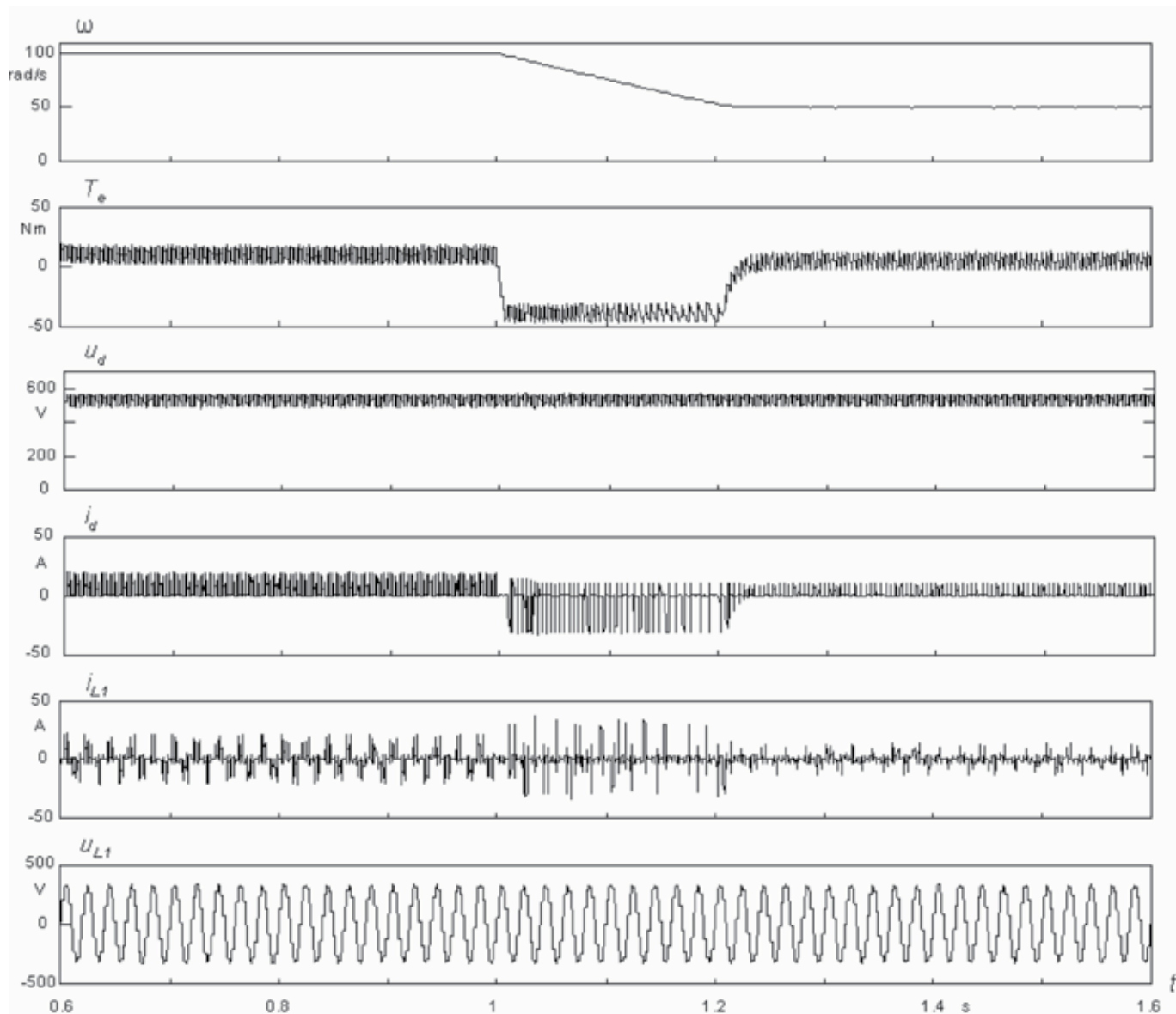
nie elementów przełączających dużej mocy o znaczącej przeciążalności i niezawodności. Konsekwencją jest konieczność zastosowania 2 tyrystorów pomocniczych $TP1$, $TP2$. Uniemożliwiają one występowanie międzyfazowych zwarcień wewnętrznych pomiędzy tyrystorami i diodami prostownika trakcyjnego D . Jeżeli $TP1$ i $TP2$ są tyrystorami SCR, to z chwilą przejścia napędu do hamowania odzyskowego, tyrystory te samoczynnie się wyłączają wskutek podniesienia napięcia na zaciskach wyjściowych podstacji. Wówczas podawane są impulsy na tyrystory mostka INV w sekwencji takiej, jak przedstawiono na rys. 5b w postaci zaciemnionych słupków q_1, q_2, \dots, q_6 . Po obniżeniu napięcia do wartości jałowej prostownika D i zaniku prądu hamowania blokowane są impulsy bramkowe tyrystorów i ponownie są wyzwolane tyrystory pomocnicze. Jako tyrystory pomocnicze moż-

na zastosować GTO, co zwiększa możliwości sterowania układu. Przebiegi ilustrujące pracę układu przedstawiono w pracy [4].

Ostatni układ, przedstawiony na rys. 4d, jest niejako dualny do układu z rys. 4c. Falownik INV jest również mostkiem tyrystorowym włączanym równolegle na sieć trakcyjną za pomocą tyrystorów wyłączalnych $TP1$ i $TP2$ (GTO) lub tranzystorów IGBT w określonych przedziałach czasu. Tyrystory mostka INV są stale sterowane sekwencją impulsów przedstawioną na rys. 5b, natomiast tyrystory pomocnicze $TP1$ i $TP2$ za pomocą impulsów q_{TP} . Układ o tej idei działania był pierwotnie przedstawiony w patencie [6], a następnie usprawniony w działaniu przez autorów [7], aby osiągnąć dopracowaną postać przedstawioną w [4]. Podobny układ można również znaleźć w patentach chińskich z lat 80. Jednakże opis alfabetem chińskim uniemożliwił ich skomentowanie.



Rys. 5. Diagram impulsów sterujących falownikiem rekuperacyjnym (numery impulsów odpowiadają numerom zaworów)



Rys. 6. Przebiegi ilustrujące pracę układu przekształtnikowego podstacji trakcyjnej z rys. 5a, dla napędu z silnikiem indukcyjnym klatkowym zasilanym falownikiem napięcia

Wnioski

Możliwość hamowania odzyskowego pojazdów trakcyjnych umożliwia z jednej strony zmniejszenie zużywanej energii elektrycznej, a z drugiej oszczędność klocków hamulcowych i obręczy kół. Niebagatelna jest również w pełni kontrolowana jakość napędowa takiego hamowania umożliwiającego nawet zatrzymanie pojazdu.

W trakcji prądu stałego o napięciach 600, 1 500 i 3 000 V z reguły stosowane są podstacje trakcyjne z prostownikiem diodowym uniemożliwiającym przekazywanie energii hamowania do sieci trójfazowej prądu przemiennego. Z tego względu konieczne jest zastosowanie dodatkowego przekształtnika pracującego jako falownik napięcia. Rozwiązania techniczne takich przekształtników podstacji przedstawiono na rys. 4. Można stwierdzić, że układy te wyczerpują możliwości realizacji. Najprostszy strukturalnie układ przedstawiono na rys. 4a. Jego sterowanie jest najłatwiejsze, w porównaniu z pozostałymi układami, umożliwiając niemal bezprzerwowe przełączenie podstacji z pracy prostownikowej na rekuperacyjną i odwrotnie, gdyż stale

sterowane zawory wyłączalne falownika utrzymują go w ciągłej gotowości do pracy, gdy zajądą w układzie warunki napięciowo prądowe do odzysku energii. Pewną wadą jest konieczność zastosowania dość drogich tyrystorów GTO w przypadku podstacji kolejowych. W przypadku podstacji miejskich falownik na IGBT może dodatkowo pracować jako filtr aktywny zapewniający duży współczynnik mocy i małe zakłócenia wnoszone do sieci prądu przemiennego podczas pracy prostownikowej podstacji. Dla zasilania kolejowego korzystny może być układ z rys. 4d zbudowany w oparciu o wysoce niezawodne tyrystory SCR i 2 GTO. Układ ten jest również stale przygotowany do podjęcia pracy rekuperacyjnej. Odkształcenia przemiennych prądów zasilających podstację są jednak większe i należy zastosować filtry pasywne typowe dla prostowników. Układ z rys. 4c jest najbardziej kłopotliwy w sterowaniu.

Osobnym zagadnieniem jest opłacalność zastosowania rekuperacji energii na podstacji. Z uproszczonych rozważań przedstawionych w rozdziale 2 wynika, że może być to korzystne w trakcji miejskiej i metrze, przy pojazdach wykonujących częste rozruchy

i hamowania. W kolejach dużych lub prawie dużych prędkości hamowanie odzyskowe może być korzystne przy znacznym wytracaniu prędkości. Wymaga to jednak szczegółowego sprawdzenia, nawet za pomocą uproszczonego modelu przedstawionego w tej pracy, gdzie łatwo można uwzględnić sposób jazdy i profil trasy.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego działalności statutowej Politechniki Krakowskiej pt. „Modernizacja podstacji trakcyjnych w celu oddawania energii hamujących pojazdów do sieci prądu przemiennego”.

Bibliografia:

1. ABB: ENVILINE ERS – Energy Recuperation System: www.abb.com/railway, www.envitech.com (dostęp 14.12.2016).
2. Cornic D., *Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation*, Alstom Transport, 1999.
3. Drozdowski P., Duda A., *Braking energy recuperator*, Polish patent application No. P.412159, 30.04.2015.
4. Drozdowski P., Duda A., *Modernised DC Traction Substation Recuperating Energy of Braking*. Conference on Sustainable Energy and Environment Development SEED 2016, AGH UST in Kraków (Poland), 17–19.05.2016.
5. Kolar J. W., Ertl H., Zach E. C., Blashko V., Kaura V., Lukaszewski R., *A Novel Concept for Regenerative Braking of PWM-VSI Drives Employing a Loss-Free Braking Resistor*, APEC'99, Conf.Proc, Twelfth Annual, Vol. 1, pp. 297–305, 1997.
6. Linden W., Gratzke W., Gehm H., *Schaltungsanordnung mit einem Wechselrichter*, Siemens AG, Germany Patent 2531391, 1975.
7. Liptak J. M., Joyner F. C., Guyeska J. C., *Regenerative Controller for a Voltage Source Inverter Drive*, Textile Ind. Tech. Conf., Charlotte, NC, pp. 10/1–10/7, 1989.
8. Secheron S. A. (Switzerland), *Inverter for DC Traction Energy Recovery*: www.secheron.com (dostęp 14.12.2016).

9. Seyed S. F., Saman F., Babak K. S., *Energy-Efficient Emplacement of Reversible DC Traction Power Substation in Urban Rail Transport through Regenerative Energy Recovery*, Int. Journal of Railway Research 2015.
10. Szelaż A., Drażek Z., Targielski M., *Badanie jakości napięcia w sieci elektroenergetycznej zasilającej prostownikowe podstacje trakcyjne – wyniki symulacji i pomiarów*, „Technika Transportu Szynowego” 2008, nr 5–6.
11. Kobielski A., Drapik S., Prusak J., Dudzik M., *Wstępne studium efektywności zastosowania sieci neuronowych w badaniach obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych*, „Technika Transportu Szynowego” 2014, nr 10.

Autorzy:

dr hab. inż. **Piotr Drozdowski**, prof. PK – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii
mgr inż. **Arkadiusz Duda** – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii

DC traction substations recuperating braking energy of vehicles

The DC traction substations are usually composed of the 3-phase transformer and the output diode rectifier. So, such devices do not allow for energy recuperation from the DC side to AC 3-phase mains. The energy recuperation is demanded for regenerative braking of traction drives with pulse converters (inverters for induction motors and choppers for DC motors). In this paper four technical solutions (Fig. 4) allowing for braking energy recuperation are discussed. This can be considered as the modernisation of the existing traction substations in the railway and the municipal traction. Such solutions indicate for three profits: energy recuperation, mechanical brakes saving and enhanced quality of traction vehicle control. The proposed converters are compared indicating individual advantages and drawbacks. Additionally the method of simplified calculation of energy balance of consumed and recuperated energy in the traction network has been presented in Chapter 2.



Adam Koliński, Maciej Stajniak (red.)

Efektywność procesów transportowych. Współczesne problemy i trendy rozwoju

ISBN: 978-83-62805-18-1

Liczba stron: 246

Format: B5

Oprawa: miękka

Rok wydania: 2016

W monografii podjęto próbę kompleksowego przedstawienia problematyki efektywności procesów transportowych, uwzględniających jej wpływ na przedsiębiorstwa i ich łańcuchy dostaw oraz rozwój regionów. Głównym celem przedstawianej monografii jest wypuklenie wzajemnych powiązań pomiędzy poszczególnymi zakresami oddziaływania działań wpływających na efektywność procesów transportowych. Z tego względu poruszaną problematykę podzielono na trzy sekcje tematyczne. W pierwszej części przedstawiona została problematyka dotycząca efektywności procesów transportowych w przedsiębiorstwach; w drugiej – skoncentrowano się na problematyce efektywności w łańcuchach dostaw, a w trzeciej – skupiono uwagę na rozwiązaniach transportowych, wpływających na efektywność i wzrost gospodarczy regionów.

Tak szeroki zakres tematyczny monografii niezbicie świadczy o ważności i wieloaspektowości poruszanej problematyki efektywności procesów transportowych. Niniejsza publikacja może stanowić ciekawą lekturę dla studentów, pracowników naukowych oraz menedżerów poszukujących optymalnych rozwiązań, wpływających na wzrost efektywności przedsiębiorstw.

Pełna oferta wydawnicza na stronie www.inw-spatium.pl