

BŁASZCZYK Piotr¹
BARAŃSKI Sławomir²

STEROWANIE WEKTOROWE SILNIKAMI INDUKCYJNYMI W KOLEJACH DUŻYCH PRĘDKOŚCI

Nowoczesne rozwiązania pociągów dużych prędkości uwzględniają układy napędowe z silnikami indukcyjnymi asynchronicznymi i synchronicznymi. Wprowadzenie tego rodzaju silników wiąże się ściśle z zastosowaniem nowoczesnych układów energoelektronicznych zasilania a w konsekwencji również precyzyjnego sterowania. Napięcie sieci trakcyjnej jest przekształcane na napięcie trójfazowe, którym poprzez układy przekształtnikowe zasilane są silniki indukcyjne. Odpowiedni rodzaj sterowania oparty na zasadzie sterowania wektorowego pozwala na niezawodną regulację prędkości obrotowej oraz na dokładne panowanie nad momentem rozwijanym zarówno przy rozpędzaniu, jak i hamowaniu pociągu.

VECTOR CONTROL INDUCTION MOTORS IN THE HIGH SPEED RAILWAYS

Modern high-speed trains include propulsion systems with asynchronous induction motors and synchronous. The introduction of such motors is closely associated with the use of modern power electronic systems and consequently also the precise control. The traction network voltage is converted into a three-phase voltage which, through integrated converters are powered by induction motors. Appropriate type of control based on the principle of vector control provides reliable speed control and precise control over both torque drop during acceleration and braking of the train.

1. WSTĘP

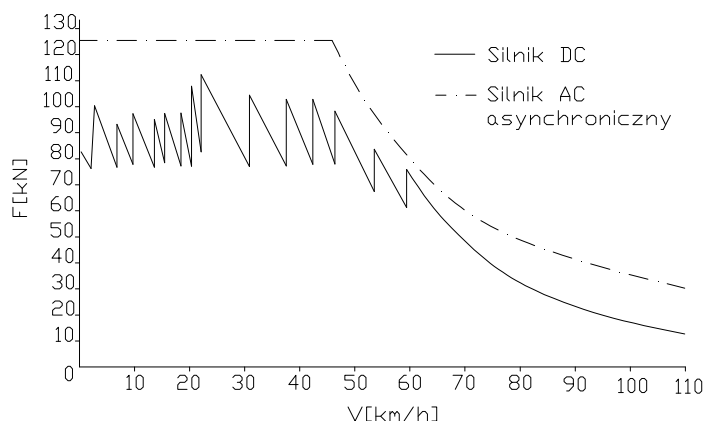
Koleje dużych prędkości prosperują od prawie 50 lat, przy czym pierwsza linia pojawiła się około 1964 roku i była nią linia Tokaido Shinkansen). Była ona odpowiedzią na problem zatłoczonych połączeń tradycyjnych kolei. Niezbędnym stał się środek transportu, który zapewniłby sprawne przemieszczanie się na duże odległości w krótkim czasie. Biorąc pod uwagę duże odległości, alternatywny transport drogowy traci na znaczeniu z powodu średniej prędkości przewozu, a co za tym idzie dłuższego czasu podróży.

Szukając najlepszych rozwiązań napędowych dla KDP, w pierwszej fazie zaproponowano napęd odrzutowy, który z powodów ekonomicznych oraz dużego hałasu zastąpiono napędem elektrycznym. Pierwszym silnikiem elektrycznym zastosowanym w

¹ Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22,
e-mail: piotr.blaszczyk@p.lodz.pl

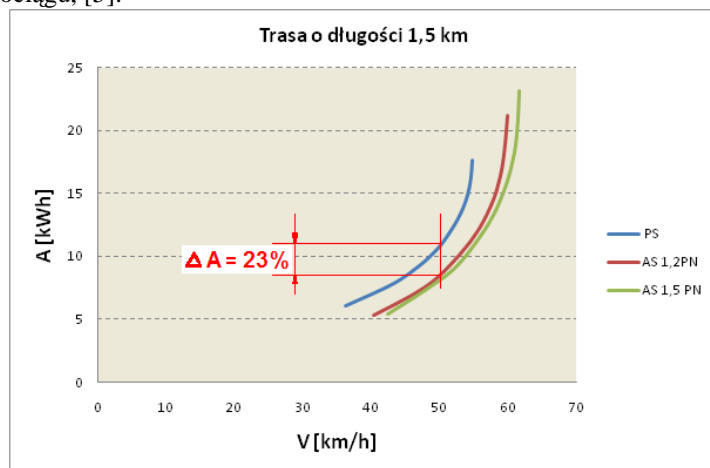
² Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22,
e-mail: slawomir.baranski@p.lodz.pl

szybkich pociągach TGV był silnik komutatorowy prądu stałego, zapożyczony z kolei konwencjonalnej ze względu na prostą ideę zasilania i sterowania. Jednakże era kolei dużej prędkości rozpoczęła się z chwilą wprowadzenia zasilania za pomocą nowoczesnych urządzeń energoelektronicznych takich jak tyrystory GTO czy tranzystory IGBT.



Rys.1. Porównanie charakterystyk trakcyjnych silników DC i AC, [2]

Wprowadzenie zasilania przekształtnikowego, pozwoliło na sterowanie silnikami prądu przemiennego w sposób bardziej elastyczny w odniesieniu do sterowania silnikami prądu stałego, rys.1. Obecnie większość pociągów dużej prędkości wyposażona jest w silniki indukcyjne asynchroniczne i synchroniczne. Odpowiedni rodzaj sterowania oparty na zasadzie sterowania wektorowego pozwala na niezawodną regulację prędkości obrotowej oraz na dokładne panowanie nad momentem rozwijanym zarówno przy rozpędzaniu, jak i hamowaniu pociągu, [5].

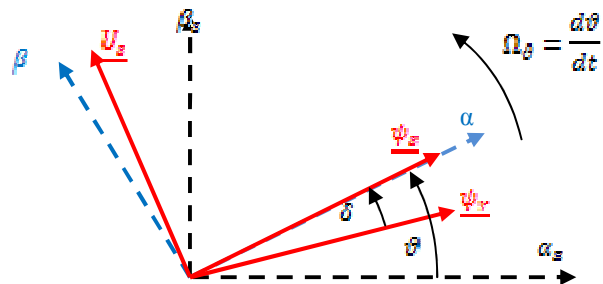


Rys.2. Charakterystyka zużycia energii $A=f(V)$ pojazdów trakcyjnych z silnikiem prądu stałego PS oraz silnikiem asynchronicznym AS, przy różnych obciążeniach dla długości trasy 1,5 km.

Silnik asynchroniczny ze względu na swoje parametry napędowe przy sterowaniu wektorowym pozwala na uzyskanie lepszych parametrów, co potwierdza literatura oraz najnowsze badania teoretyczne i praktyczne. Charakterystyki badawcze wskazują, że dla przejazdów teoretycznych, niezależnie od długości trasy, napęd asynchroniczny charakteryzuje się mniejszym zużyciem energii. Dotyczy to zarówno pracy przy mocy znamionowej jak i przeciążeniach 1,2 PN oraz 1,5PN. Przykładowo dla prędkości 50 km/h następuje zmniejszenie zużycia energii przez pojazd trakcyjny z napędem asynchronicznym o około 23%, rys.2.

2. STEROWANIE WEKTOROWE SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

Bezpośrednie sterowanie momentem DTC (Direct Torque Control) jest nowoczesnym sposobem sterowania silnikiem indukcyjnym o lepszych właściwościach regulacyjnych w odniesieniu do sterowania skalarnego czy też sterowania FOC.

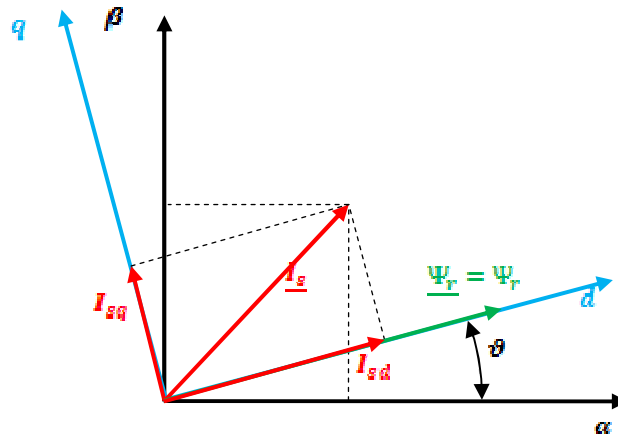


Rys.3. Powiązanie wektorów przy bezpośrednim sterowaniu momentem DTC

Metoda DTC zapewnia prawidłową pracę układu w stanach ustalonych jak i przejściowych. Oprócz nastawianej amplitudy i częstotliwości nastawiane są również fazy wektorów przestrzennych napięć, prądów i strumieni skojarzonych silnika klatkowego.

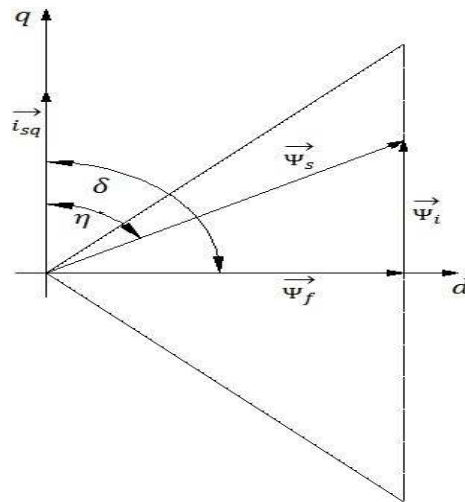
Wykres wektorowy opisujący ideę sterowania przedstawiono na rysunku 3. W krótkich odstępach czasu przyrost wektora napięcia stojana U_s odpowiada przyrostowi wektora strumienia stojana Ψ_s . W przypadku tym składowe rzeczywiste i urojone obu przyrostów wektorów są zależne wyłącznie od siebie. Oś rzeczywista α układu współrzędnych pokrywa się z położeniem wektora strumienia stojana oraz wektory napięcia i strumienia są do siebie prostopadłe. Zatem skokowa zmiana składowej rzeczywistej wektora napięcia stojana powoduje zmianę długości wektora strumienia. Natomiast skokowa zmiana składowej urojonej wektora napięcia powoduje niewielki obrót wektora strumienia względem osi układu współrzędnych.

Jednym z przykładów jest metoda sterowania polowo zorientowanego FOC (*Field Oriented Control*) polega na kontroli położenia wektora pola wirnika. Cechą charakterystyczną wszystkich rozwiązań sterowania polowo zorientowanego jest przekształcenie wielkości i sygnałów silnika do dwóch układów współrzędnych. Sterowanie pracą silnika odbywa się poprzez dwie składowe prądu stojana I_{sd} i I_{sq} opisane w prostokątnym, wirującym współbieżnie z wektorem strumienia układzie współrzędnych d,q . Układ współrzędnych zorientowany jest tak, że oś rzeczywista d pokrywa się z wektorem strumienia wirnika, rys. 4.



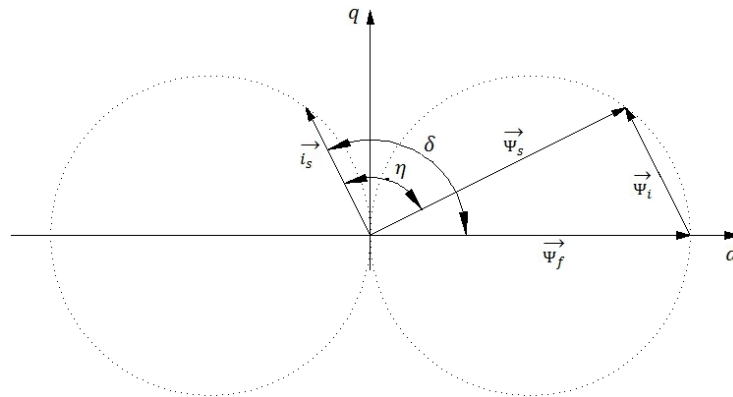
Rys.4. Powiązanie wektorów przy sterowaniu połowo zorientowanym silnikiem indukcyjnym

Przedstawione powyżej metody sterowania dedykowane są dla układów napędowych z silnikami indukcyjnymi asynchronicznymi, dla układów z silnikami synchronicznymi najczęstsze metody sterowania to: sterowanie z zachowaniem stałego kąta mocy $\delta=\pi/2$, sterowania z zachowaniem maksymalnego współczynnika mocy $\cos\varphi=1$, sterowanie z zachowaniem stałego strumienia stojana $\Psi_s=\text{const}$ oraz sterowanie maksymalizujące stosunek momentu do amplitudy prądu stojana. Uwzględniając powyżej wymienione metody sterowania dla silników synchronicznych można zauważyć, że najbardziej korzystną z zaprezentowanych jest strategia z zachowaniem stałego kąta mocy $\delta=\pi/2$, rys. 5.



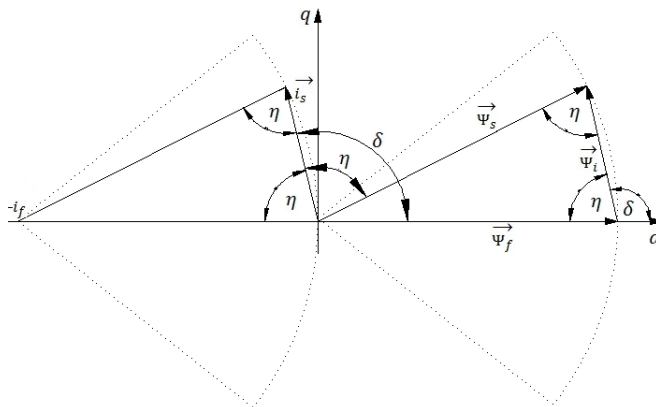
Rys.5. Sterowanie z zachowaniem stałego kąta mocy $\delta=\pi/2$, położenie wektorów strumieni i prądów w układzie współrzędnych dq [1]

Dla typowych układów napędowych z silnikami synchronicznymi istotne jest wypracowywanie większych wartości momentu przy tym samym prądzie, w odróżnieniu od strategii z zachowaniem stałego współczynnika mocy $\cos\varphi=1$, oraz strategii z zachowaniem stałej wartości strumienia $\Psi_s = \text{const}$.



Rys.6. Sterowanie z zachowaniem stałego współczynnika mocy $\cos\varphi=1$, położenie wektorów strumieni i prądów w układzie współrzędnych dq [1]

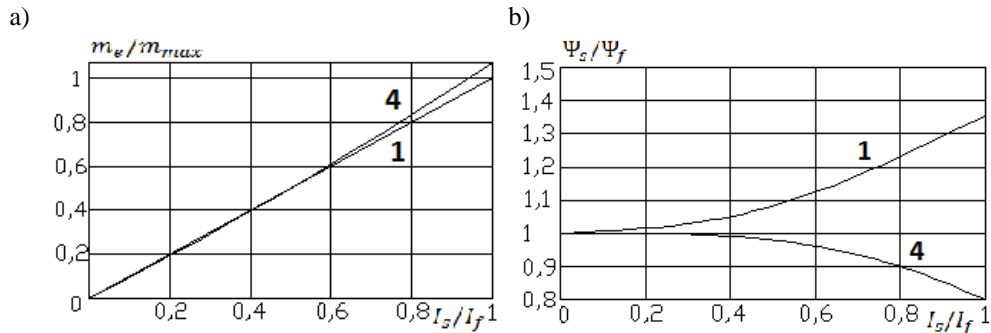
Ponadto wariant strategii z zachowaniem stałego kąta mocy jest najkorzystniejszy pod względem odsprężenia struktur regulacji dla silników synchronicznych pracujących jako serwonapędy. Strategia ta dla przypadku wzrastającego momentu oraz amplitudy prądu uwzględnia wzrost amplitudy skojarzonego strumienia stojana. W przypadku strategii zachowania stałego współczynnika mocy mamy do czynienia z bezpośrednim przekształceniem mocy pozornej na moc czynną, rys. 6. Strategia sterowania ze stałym współczynnikiem mocy jest rozwiązaniem najkorzystniejszym w silnikach dużej mocy, takich jak proponuje się dla kolei dużych prędkości.



Rys.7. Sterowanie z zachowaniem stałego strumienia stojana $\Psi_s = \text{const}$, położenie wektorów strumieni i prądów w układzie współrzędnych dq [1]

W strategii zachowania stałej amplitudy strumienia skojarzonego stojana, napęd uzyskuje mniejszy przyrost momentu w odniesieniu do pobieranego prądu.

Dla strategii przy $\delta=\pi/2$ oraz strategii maksymalizującej stosunek momentu do amplitudy prądu stojana przebiegi charakterystyk $M=f(I)$, rys. 7a jest bardzo podobny, co sugeruje podobieństwo strategii sterowania.



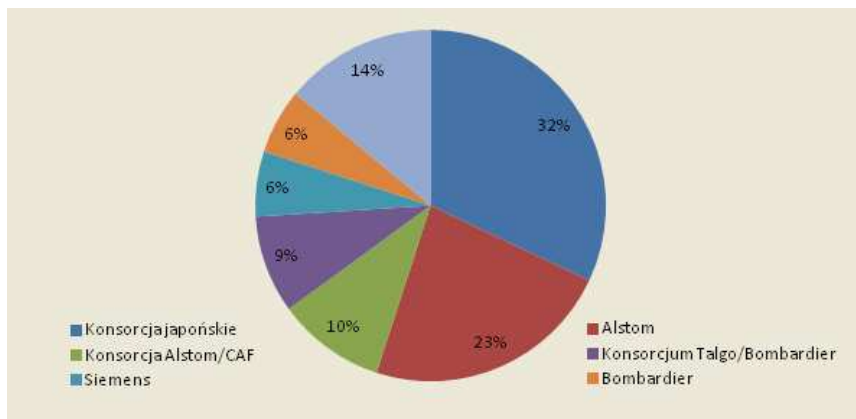
Rys.8. Porównanie charakterystyk: a) $M=f(I)$ oraz b) $\Psi=f(I)$ dla metod sterowania z zachowaniem stałego kąta mocy $\delta=\pi/2$ (1) z metodą sterowania maksymalizującą stosunek momentu do amplitudy prądu stojana (4), [1].

Wynika z nich, że ostatnia zaprezentowana strategia pozwala szybciej osiągnąć zadany moment elektromagnetyczny przy określonej wartości prądu stojana w odniesieniu do pierwszej strategii. Tendencja ta zależna jest od asymetrii obwodu magnetycznego, co szczególnie widoczne jest przy dużej asymetrii indukcyjności w osiach d i q . W strategii maksymalizującej stosunek momentu do amplitudy prądu stojana prąd w osi d rozmagnesowuje cały układ co można zaobserwować na charakterystyce z rysunku 8. Wadą tego układu jest sprzężenie skośne pomiędzy obwodami regulacji prądów w osi d i q oraz w obwodzie regulacji momentu co jednoznacznie wpływa na zmniejszenie dynamiki regulacji momentu.[1]

3. ROZWIĄZANIA LOKOMOTYW KDP Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

Dzisiejszy rynek kolejowy definiuje firmy produkujące lokomotywy o parametrach pozwalających na zastosowanie dla kolei dużych prędkości, rys. 9.

To dzięki nim wiele państw cieszy się dzisiaj komunikacją o wysokim komforcie podróży, krótkim czasie przejazdu i jednocześnie wspiera rozwój gospodarczy kraju. Do wiodących producentów pociągów kolei dużej prędkości należą korporacje azjatyckie, najprężniej rozwijające kolei dużej prędkości z pośród wszystkich regionów świata.

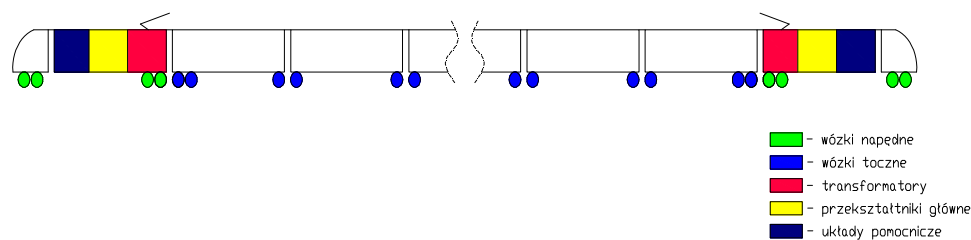


Rys.9. Rozkład procentowy udziału producentów lokomotyw KDP na rynku globalnym.

3.1 Pociągi TGV

TGV-A jest konstrukcją wykorzystującą napęd skupiony, czyli taki w którym wagony napędowe usytuowane są na końcach składu nie zawierając miejsc dla pasażerów. Cała przestrzeń przeznaczona jest dla kabiny maszynisty oraz urządzeń energoelektronicznych, rys. 9. Konstrukcja pociągu zawieszona jest na wspólnych wózkach (połączenie Jacobsa), z wyjątkiem wagonów napędowych te indywidualnie osadzone są na dwóch wózkach. W tym modelu Alstom po raz pierwszy zastosował w układzie napędowym silniki prądu przemiennego synchroniczne o mocy 1100 kW każdy, [4]. Lokomotywa z silnikiem synchronicznym posiada dużo lepszy stosunek mocy do masy, prawie dwukrotnie większy w odniesieniu do poprzedniego modelu TGV-Sud-Est z silnikami prądu stałego, rys. 10. Zasadnicza różnica wynika z odpowiedniej mocy układu napędowego i sposobu sterowania. Poprzedni model potrzebował 12 silników, które łącznie dawały 6450 kW, a w przypadku zastosowania napędu indukcyjnego wystarcza 8 silników o mocy całkowitej 8800 kW. Jednocześnie moc ta wystarcza by osiągnąć prędkość 300 km/h w 6 minut i 30 sekund na odcinku 3,5 km. Sposób zamocowania silników na pudłach wagonu napędowego, pozwala na lepsze odsprężynowanie i poprawę właściwości napędowych całego układu. Wózki zamontowano na podwójnym odsprężynowaniu, gdzie: I stopień to sprężyny mechaniczne spiralne firmy Flexicoi, a II wyposażony jest w poduszki pneumatyczne. Dwu-systemowe zasilanie pociąg pozwala na obsługę: napięcie prądu przemiennego rzędu 25 kV 50 Hz oraz prądu stałego 1,5 kV przetwarzanego za pomocą czoperów z tyrystorami GTO. Chłodzenie urządzeń energoelektrycznych odbywa się za pomocą zbiorników z freonem. Przy zasilaniu 25 kV 50 Hz TGV-A uzyskuje 8800 kW mocy, przy zasilaniu napięciem stałym 1,5kV uzyskujemy 3800 kW mocy. Przy tak dużych prędkościach zastosowano specjalny system hamulcowy w postaci tarczowych hamulców zamontowanych na wózkach tocznych oraz hamulców elektrodynamicznych z klockami hamulcowych na wózkach napędowych. Skład ten w 1990r. pobił rekord prędkości wynoszący 515,2 km/h przy układzie S+D+D+D+S oraz zwiększeniu średnicy koła z 920

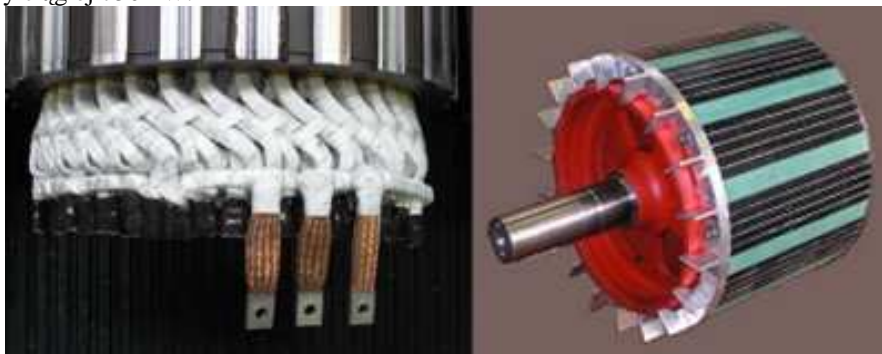
mm na 1090 mm i zwiększonym napięciu zasilania do 29,5 kV z podstawowego 25 kV 50 Hz.



Rys.10. Schematyczny rozkład urządzeń systemowych pociągu TGV-A.

3.1 Pociąg AGV

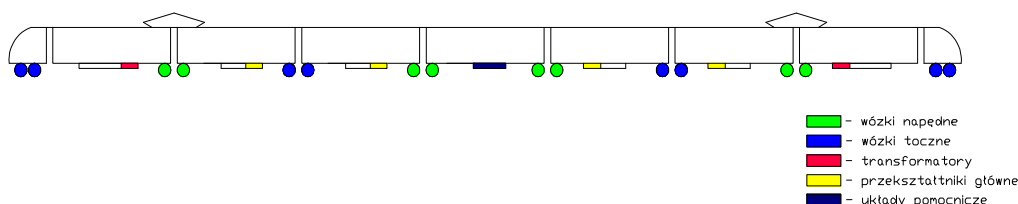
Pociąg o zupełnie nowych założeniach konstrukcyjnych, dzięki którym uzyskano znacznie lepsze osiągi przy jednoczesnym zmniejszeniu masy układu napędowego. AGV jest pociągiem cztero-systemowym, pracując odpowiednio na napięciach: 1,5 kV DC uzyskuje prędkość 200 km/h, na 3 kV DC - 250 km/h, 15 kV 16 2/3 Hz AC - 320 km/h oraz 25 kV 50 Hz uzyskuje prędkość około 360 km/h. Zastosowano tutaj nowej generacji silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu 12LCS3550B, rys.11. Pozwala uzyskać prędkości od 3000 do 4570 obr/min przy masie 750 kg i wymiarach 680x690x735mm oraz mocy ciągłej 750 kW.



Rys.11. Silnik synchroniczny stosowany w lokomotywach AGV, [6]

Silnik ten charakteryzuje się istotnie mniejszą masą w odniesieniu do silnika asynchronicznego, przez co zajmuje mniej miejsca o około 33%. Zastosowane specjalne magnesy trwałe, które generują bardzo silne pole magnetyczne, pozwalają na zmniejszenie straty energii. Sprawność układu napędowego z tymi silnikami sięga 97%. Porównując układ napędowy z silnikiem asynchronicznym gdzie wskaźnik mocy wynosił 0,8 kW/kg masy do układu napędowego z silnikiem synchronicznym uzyskano 1 kW/kg masy, [6]. Poprzedni układ napędowy pracował przy sterowaniu z falowników tranzystorowych

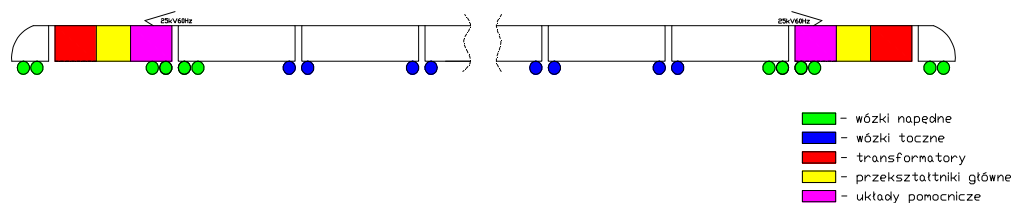
IGBT, dla układu napędowego z silnikiem synchronicznym jest możliwość wykorzystania również tyrystorów GTO(wytwarzając niższe napięcie), rys. 12.



Rys.12. Schematyczny rozkład urządzeń systemowych pociągu AGV.

3.1 Pociągi KTX I i KTX II

Współpraca konsorcjum Korea High Speed Rail Construction Authority i francuskiego GEC Alstom doprowadziła do powstania pierwszej południowo koreańska sieci kolei dużych prędkości. Przyjęto nazwę KTX(Korean Train Express), pomimo wykorzystania technologii zastosowanej w modelu TGV Réseau. Pierwsze lokomotywy produkowano w fabryce Alstom 1998r., resztę składu w ramach umowy produkowano w rodzimej koreańskiej firmie Rotem. Pierwszy skład KTX 13 pokonał odcinek Seul – Pusan w 2003r. Podczas testów osiągnął prędkość 300 km/h w 365s. Tabor składa się z 20 wagonów, w tym dwóch napędowych rozmieszczonych na końcach składu, rys. 13.



Rys.13. Schematyczny rozkład urządzeń systemowych pociągu KTX.

Wagony napędowe wyposażono w silniki synchroniczne trójfazowe typu SM 47(1,5kV) o mocy 1130kW. Zastosowano ich aż 12 w składzie, ze względu na umiejscowienie wózków napędowych również w sąsiednich wagonach pasażerskich. Zastosowane silniki ważą odpowiednio po 1555kg i mają wymiary (660x660x900)mm. Posiadają maksymalny moment obrotowy 6900 Nm i uzyskują prędkość obrotową 4000 obr/min. W KTX zastosowano silniki synchroniczne o łącznej mocy 13560 kW, co pozwala osiągać prędkość maksymalną 300 km/h w 6 min i 8 s. Zasilanie silników zapewniają trzy transformatory dużej mocy, poprzez układ przekształtników tyrystorowych GTO chłodzonych powietrzem. Transformatory pokładowe zasilane są z sieci 25 kV 60Hz (inaczej niż standardowe

zasilanie 25kV i 50Hz), pociąg jest jednostką 1-systemową, przy czym uwzględniono możliwość hamowania odzyskowego. Koncernu Rotem zaproponował w 2010 roku lokomotywy nowej generacji. Na bazie doświadczeń eksploatacyjnych, konstruktorskich i technologicznych, stworzono nową wersję KTX o nazwie KTX II. W pociągach tych zastosowano silniki asynchroniczne o mocy 1100 kW. Zastosowano osiem silników asynchronicznych o łącznej mocy 8800 kW, zasilanych z przekształtników z tranzystorami bipolarnymi IGBT(z chłodzeniem wodnym). Wprowadzono mniejsze składy 10-cio członowe, co pozwala taborowi osiągnąć siłę pociągową rzędu 210 kN i prędkość maksymalną na poziomie 330 km/h.

4. WNIOSKI

Widoczny kierunek rozwoju kolei dużych prędkości to dominacja silników prądu przemiennego nad silnikami prądu stałego. Bardzo szybki postęp w dziedzinie energoelektroniki oraz intensywny rozwój systemów sterowania, definiuje kierunek rozwoju układów napędowych z silnikami indukcyjnymi. Różnica pomiędzy sterowaniem w układach napędowych prądu przemiennego i stałego najlepiej widoczna jest dla charakterystyki trakcyjnej, rys. 1, 2. Istotną zaletą zastosowania sterowania wektorowego w silnikach indukcyjnych jest uzyskanie liniowej charakterystyki trakcyjnej. Dodatkową zaletą jest zmniejszenie zużycia energii. Potrzeba prędkości przekraczających 300 km/h oraz dostosowanie się do kryterium obciążenia na jedną oś nie przekraczającego 17t, zmusza konstruktorów do zastosowania napędu rozłożonego z odpowiednim systemem sterowania. Przykład rozwoju pociągów dużej prędkości TGV wskazuje potrzebę opracowywania odpowiednich technik sterowania układami napędowymi z silnikami AC. W przypadku zmiany napędu z asynchronicznego na synchroniczny z magnesami trwałymi uzyskano istotne zmniejszenie masy układu napędowego. W wyniku zastosowania magnesów trwałych w nowoczesnych silnikach synchronicznych zwiększa się sprawność układu napędowego, a wskaźnik mocy do masy zwiększa się do 1 kW/kg, [6].

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Zawirski K.: *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, WPP, 2005.
- [2] Biliński J., Frydryński R., Gmurczyk E.: *Modernizacja systemu napędowego elektrycznego zespołu trakcyjnego EN-57 z zastosowanym silnikiem asynchronicznym*. Tts 12, 2008.
- [3] *International Railway Journal*, 4, 2009.
- [4] Błaszczak P.: *Przegląd światowych rozwiązań kolei dużych prędkości z silnikami indukcyjnymi sterowanymi wektorowo*, Nowa Elektrotechnika, Nr 10, 2010.
- [5] Błaszczak P., Wawrzyniak A.: *Wpływ sposobu jazdy maszynisty na zużycie energii trakcyjnej*, Nowa Elektrotechnika, Nr 4, 2010.
- [6] Graff M.: *AGV-Nowy pociąg dużych prędkości*. Tts 4, 2008.