

Zespoły prostownikowe 12-pulsowe do podstacji trakcyjnych PKP zasilanych średnim napięciem

Opracowana w Zakładzie Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki oraz wdrożona do produkcji w Fabryce ELTA i eksploatowana na podstacjach trakcyjnych PKP od ponad 15 lat pierwsza generacja 12-pulsowych trakcyjnych zespołów prostownikowych (typu PD-16/3,3 i PD-12/3,3) spełniała wymagania energetyki w zakresie dopuszczalnej wielkości współczynnika odkształcenia napięcia w linii zasilającej [1, 2, 3].

Prostowniki tych zespołów o układzie dwóch szeregowo połączonych 3-fazowych mostków zostały oparte o krajowe (Lamina) moduły diodowe typu MOD9P-1600-20-T i MOD9P-1000-20-T. Prostowniki te mają sztywne połączenia między modułami i szynami R, S, T, (+), (-), co może mieć ujemny wpływ na poprawną pracę na styku pastylkowej diody z aluminiowym radiatorem. Zastosowany w nich bezpośredni pomiar napięcia i prądu z tablicowymi miernikami nie daje możliwości komunikacji z systemem zdalnego sterowania. Trójzwojeniowe (Y/d11yo) olejowe transformatory prostownikowe tych zespołów o mocach 5850 kVA i 4400 kVA przy napięciach zasilania 3×15 kV lub 3×20 kV i gwarantowanym napięciu zwarcia 8% są wyposażone w beznapięciowy 5-pozycyjny przełącznik zaczełów w uzgodnionym zakresie od -2,5% do +7,5% [1, 2].

Jak wykazały, przeprowadzone przez różne ośrodki badawcze, analizy techniczne i symulacje komputerowe, zespoły te nie będą mogły w pełni zapewnić utrzymania w dopuszczalnym zakresie wahań napięcia w sieciach trakcyjnych linii szybkiego ruchu w wyniku przewidywanego dla nich zmiennego obciążenia. Jednym z podstawowych powodów jest zbyt „pochyła” ich charakterystyka zewnętrzna oraz stosunkowo duże spadki napięcia w typowych liniach zasilających średniego napięcia, a w szczególności liniach napowietrznych [4].

Celem uzyskania znacznego zmniejszenia wpływu spadku napięcia w liniach zasilających podstacje trakcyjne na zakres wahań napięcia w wymienionych sieciach trakcyjnych,

z kilku rozważanych jako technicznie uzasadnionych wariantów rozwiązań został przez PKP przyjęty wariant budowy nowego 12-fazowego zespołu prostownikowego o mocy ok. 7 MVA z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV.

Przyjęcie wariantu zasilania podstacji trakcyjnej napięciem WN – 110 kV związane było z koniecznością opracowania drugiej generacji, 12-pulsowych trakcyjnych zespołów prostownikowych. Wykonanie prototypu takiego zespołu prostownikowego zostało powierzono Zakładom Wytwórczym Maszyn Elektrycznych i Transformatorów EMIT S.A. w Żychlinie. Zespół taki, składający się z trzech podstawowo różnych pod względem wykonania i wymagań technicznych podzespołów, tj. 4-uzwojeniowego wysokonapięciowego transformatora prostownikowego o mocy 6,3 MVA – 1 MVA i napięciu zwarcia 11% z regulacją napięcia $\pm 10\%$, prostownika diodowego o dwóch szeregowo połączonych 3-fazowych mostkach o wysokiej odporności zwarciowej i przepięciowej oraz powietrznego dławika wygładzającego o dużej indukcyjności, będącego jednocześnie elementem składowym filtra gamma dla tego zespołu, został zaprojektowany i wykonany w kilku specjalistycznych, współpracujących z Emitem zakładach. I tak projekt tego transformatora i dławika został opracowany w Oddziale Transformatorów Instytutu Energetyki, a ich wykonanie i zbadanie nastąpiło w Zakładzie EMIT. Prostownik natomiast został zaprojektowany, wykonany i zbadany w Zakładzie Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki (rys. 1). Zespół taki został nazwany zespołem prostownikowym z jednostopniową transformacją napięcia 110 kV AC/3 kV DC (oznaczony typem ZP-1,7/3,3-1700 A/3300 V).

W celu zapewnienia możliwości regulacji napięcia w sieci trakcyjnej w zależności od wahań napięcia WN w linii zasilającej czy zwiększonego obciążenia w sieci trakcyjnej, transformator prostownikowy tego zespołu po stronie górnego napięcia (GN – 110 kV) został wyposażony w wielopozycyjny przełącznik zaczełów z możliwością regulacji napięcia pod obciążeniem od -10% do +10% (co 1,25%) [5].

Wymagania dla nowego zespołu prostownikowego

Z uwagi na to, iż nie w każdym przypadku modernizowanych linii kolejowych, a w szczególności szybkiego ruchu (do



Rys. 1. Prostownik diodowy 1700 A, 3300 V dla podstacji trakcyjnej z jednostopniową transformacją napięcia 110 kV AC/3 kV DC

200 km/h), będzie możliwość zapewnienia zasilania podstacji trakcyjnych tych linii napięciem WN – 110 kV, zaistniała zatem technicznie uzasadniona potrzeba opracowania nowych 12-pulsowych zespołów prostownikowych dla podstacji trakcyjnych posiadających tylko możliwość zasilania ich średnim napięciem SN – 15 kV lub 20 kV (odmiana drugiej generacji prostowników). Zespoły takie, aby uzyskać istotny wpływ na wielkość zakresu wahań napięcia w sieci trakcyjnej powinny charakteryzować się następującymi cechami:

- 1) powinny być zespołami o znamionowym prądzie wyprostowanym 1700 A dla III klasy przeciążalności prądowej (kpp) według PN-IEC 146-1-1+AC i napięciu 3300 V, oraz 1100 A dla VIb klasy przeciążalności prądowej (kpp) według IEC 84 z 1957 r. i napięciu 3300 V;
- 2) powinny zapewnić mniejsze pochylenie charakterystyki zewnętrznej, co oznacza, że transformatory prostownikowe tych zespołów muszą mieć mniejsze procentowe napięcie zwarcia;
- 3) transformatory prostownikowe po stronie zasilania powinny być wyposażone w wielopozycyjne przełączniki zaczepek pod obciążeniem.

Ponadto byłoby wskazane, aby linie SN, zasilające podstacje trakcyjne, były liniami kablowymi lub wzmocnionymi liniami napowietrznymi (większy przekrój, czy inny rodzaj przewodu).

Należy nadmienić, iż zespoły takie z reguły będą pracować na podstacjach bezobsługowych objętych systemem zdalnego sterowania, a zatem powinny to być zespoły maksymalnie odporne na wszelkiego rodzaju zagrożenia natury przetężeniowej (przeciążenia, zwarcia) i przepięciowej (atmosferyczne, łączeniowe), jakie mogą występować w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Dodatkowo prostowniki diodowe tych zespołów, jako elementy najbardziej podatne na wymienione zagrożenia, powinny być wyposażone w odpowiedni system pomiarowo-kontrolny, taki, który mógłby w aktywny sposób współpracować z zastosowanym dla danej podstacji trakcyjnej systemem zdalnego sterowania (np. CAN-BUS).

Rozwiązanie konstrukcyjne nowych, 12-pulsowych trakcyjnych zespołów prostownikowych

Technicznie udokumentowana konieczność stosowania nowych, 12-pulsowych zespołów prostownikowych na podstacjach trakcyjnych zasilanych średnim napięciem (SN) na modernizowanych liniach szybkiego ruchu była podstawą do opracowania takich zespołów przez Zakład Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki. Przy realizacji tego zadania wykorzystano ponad dwuletnie doświadczenia poprawnianie pracującego na CMK (podstacja Huta Zawadzka) zespołu prostownikowego z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV opracowanego i wykonanego przez Instytut Elektrotechniki.

Opracowany w Zakładzie Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki projekt prostownika diodowego dla przedstawionego na rysunku 2 zespołu prostownikowego składa się z wolno stojących dwóch szaf zestawów diodowych typu ZD-2,1/1,65 (2100 A dla I kpp/1650 V) o ukła-

dzie prostowniczymi mostków 3-fazowych połączonych szeregowo i jednej szafy aparatu-pomiarowej (4 kV DC).

W każdej szafie zestawów diodowych (ZD), na specjalnej izolacyjnej konstrukcji wsporczej, zapewniającej ukośność (pod kątem 30° do poziomu) zamontowanie modułów diodowych, znajduje się w zależności od przeznaczenia prostownika (podstacja budynkowa lub kontenerowa) po 36 lub 18 modułów diodowych złożonych z diod pastylkowych o prądzie 2500 A i napięciu 2500 V i aluminiowych radiatorów RY205w (z miedzianymi szynowymi wyprowadzeniami prądowymi) lub diod pastylkowych o prądzie 5000 A i napięciu 2600 V i aluminiowych radiatorów CO5750 P. Na tej samej konstrukcji izolacyjnej szafy zestawu diodowego w tylnej jej części znajdują się szyny zasilające R, S, T i wyjściowe (+), (-). W szafie ZD od strony (-) została umieszczona sonda do pomiaru temperatury obudowy wybranej diody i jej radiatora w górnej jego części. Celem wyeliminowania niepożądanych naprężeń mechanicznych na styku dioda–radiator wszystkie połączenia modułów diodowych w szafie ZD, tzn. szeregowo między modułami oraz modułów do szyn zasilających i wyjściowych, zostały wykonane za pomocą elastycznych łączówek z płaskiej pocielanej plecionki miedzianej (160 mm²).

W szafie aparatu-pomiarowej, znajdującej się po stronie (-) szeregowo połączonych szaf zestawów diodowych, znajduje się boczny pomiarowy i sonda do pomiaru napięcia i prądu wyprostowanego oraz izolacyjna płyta z rozmieszczonymi elementami obwodów RC zabezpieczających diody od przepięć łączeniowych. Na przednich drzwiach tej szafy zamontowane zostało urządzenie pomiarowe MPZ-10.

Dane techniczne prostownika diodowego

Oznaczenie typu prostownika dla podstacji:

- budynkowej PD-1,7/3,3
- kontenerowej PD-1,7/3,3k

Dopuszczalna szczytowa wartość prądu zwarcia dla:

| | PD-1,7/3,3 | PD-1,7/3,3k |
|--------|------------|-------------|
| 20 ms | 41 kA | 57 kA |
| 200 ms | 22 kA | 29,8 kA |

Przykładowy przebieg charakterystyk przeciążalności zwarciowej zespołu prostownikowego ZP-1,7/3,3-SN dla sieci o Sz-300 MVA i prostownika z diodami o prądzie 2500 A przedstawiono na rysunku 3.

Strata mocy w diodach dla prostownika przy prądzie:

| | | |
|------------------|-------|-------|
| 1700 A (III kpp) | 21 kW | 18 kW |
| 1100 A (VIb kpp) | 13 kW | 11 kW |

Wytrzymałość przepięciowa prostowników dla pracy:

| | |
|---|-------|
| normalnej tj. $\eta_s = 3(\eta_{sn})$ | 21 kV |
| awaryjnej tj. $\eta_s = 2(\eta_{sn} - 1)$ | 15 kV |

(dla obydwu prostowników $\eta_{sn} = 3$).

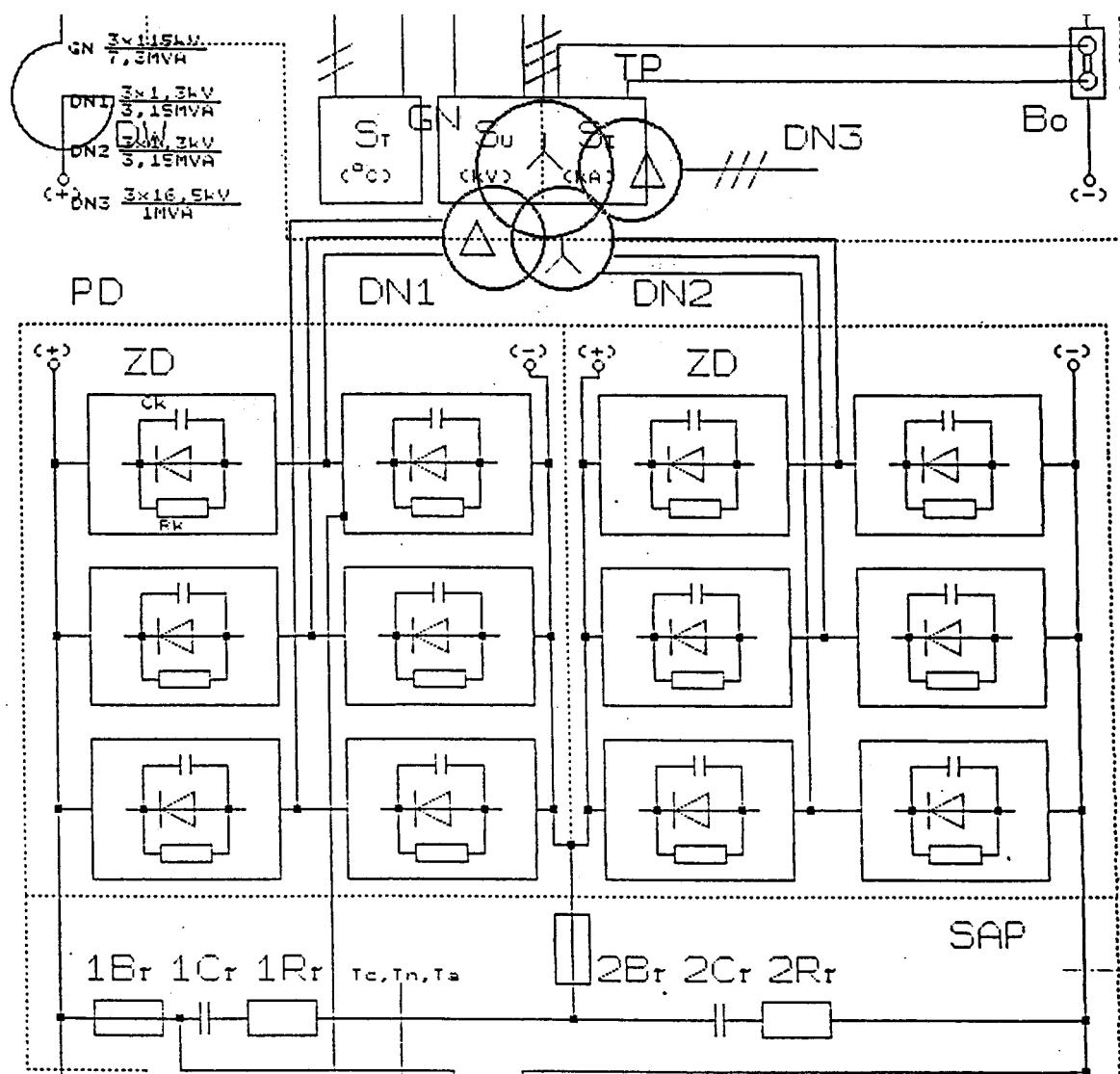
Dławiki wygładzające bezrdzeniowe o naturalnym chłodzeniu i obciążalności prądowej, takiej jak prostowniki będą mieć indukcyjność 1,8 mH lub 6 mH w zależności od rodzaju zastosowanego na podstacji trakcyjnej urządzenia wygładzającego, tzw. rezonansowego (producent – PKRE S.A.) lub filtru typu gamma (producent – APENA).

Szafy zestawów diodowych wyposażone są z obydwu stron (przodu i tyłu) w podwójne, osiatkowane drzwi z zamkiem, celem zapewnienia właściwego i jednakowego chłodzenia dla wszystkich modułów diodowych (dioda–radiator), zaś szafa aparatuowo-pomiarowa ma również z obydwu stron drzwi z zamkiem, lecz pojedyncze i pełne. Ponadto szafy te od góry i od dołu są odkryte, przy czym od góry mają uchwyty transportowe, a od dołu otwory umożliwiające umocowanie ich w miejscu zainstalowania i po 2 ocynkowane

zaciski do podłączenia metalowej konstrukcji tych szaf z magistralą uziemioną podstacji.

Obwody pomiarowe i sterowniczo-sygnalizacyjne projektowanego prostownika diodowego PD-1,7/3,3

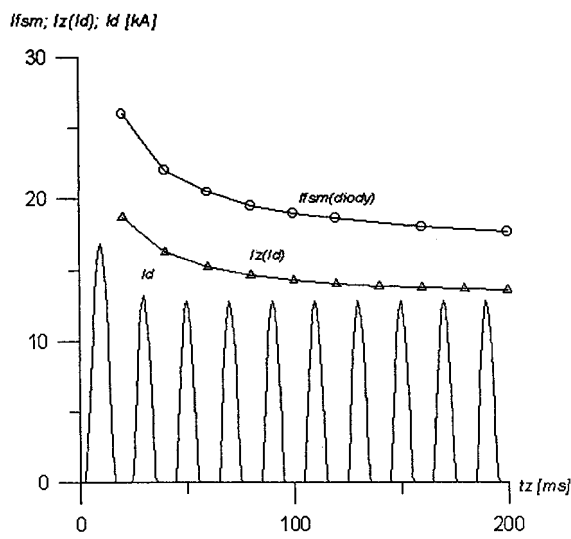
W odróżnieniu od dotychczas eksploatowanych trakcyjnych prostownikach diodowych (pierwsza generacja) wyposażonych tylko w wizualny pomiar napięcia i prądu wyprostowanego przy użyciu typowych tablicowych mierników wskazów-



Rys. 2. Schemat ideowy zespołu prostownikowego

TP - transformator prostownikowy typu TOC Rp 7000/115; PD - prostownik diodowy typu PD-1,7/3,3; ZD - zestaw diodowy; DW - dławik wygładzający typu DW-6/1,7; SAP - szafa aparatuowo-pomiarowa; Su - miernik napięcia; St - miernik temperatury; S1 - miernik prądu; 1Br, 2Br - bezpiecznik; 1Cr, 2Cr - kondensator; 1Rr, 2Rr - rezystor; Bo - bocznik; Rk - rezystor; Ck - kondensator

kowych, z których woltomierz znajduje się na wysokim potencjale (3 kV DC) [1], obecnie produkowane prostowniki przeznaczone do pracy na bezobsługowych podstacjach trakcyjnych, zwłaszcza objętych systemem zdalnego sterowania, powinny być wyposażone w takie elektroniczne urządzenia, które oprócz funkcji pomiarowych – istotnych dla ich poprawnej pracy – powinny ponadto spełniać odpowiednie funkcje sterownicze i zabezpieczające [2]. Urządzeniem takim będzie elektroniczne urządzenie typu MPZ-10 [4] (Moduł Pomiarowy Zespołu) zastosowane poraz pierwszy w zaprojektowanym i wykonanym w Zakładzie Przesztaltników Mocy Instytutu Elektrotechniki prostowniku diodowym PD-1,7/3,3 dla trakcyjnego zespołu prostownikowego ZP-1,7/3,3 z jednostopniową transformacją napięcia 110 kV AC/3 kV DC [3].



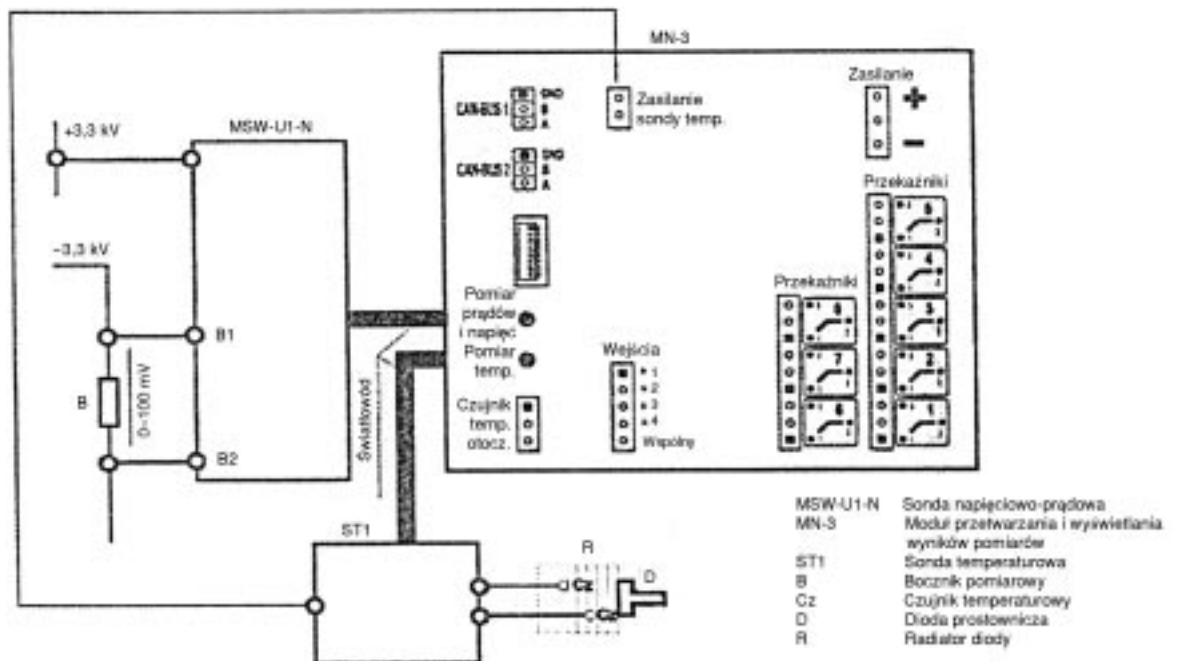
Rys. 3. Przewidywana znośność zwojowa prostownika PD-1,7/3,3

Prototyp takiego urządzenia, zgodnie z naszymi (IEI) wytycznymi, został opracowany i wykonany przez firmę MySoft w Warszawie w oparciu o produkowane tam na potrzeby zasilaczy trakcyjnych PKP urządzenia MPZ-01; -04; -14 przeznaczone tylko do pomiaru prądu i napięcia wyprostowanego oraz przesyłania danych pomiarowych do systemu zdalnego sterowania z magistralą CAN-BUS. Urządzenie MPZ-10, składające się z niskonapięciowego modułu odczytowego połączonego światłowodem ze specjalistycznymi znajdującymi się na wysokim potencjale sondami pomiarowymi, umożliwia jednocześnie dokonywanie następujących pomiarów i przesyłanie ich do systemu zdalnego sterowania (rys. 4), mianowicie:

- napięcia i prądu wyprostowanego;
- temperatury obudowy diody, jej radiatora;
- temperatury powietrza chłodzącego w szafie prostownika.

Urządzenie to jest ponadto wyposażone w przełączniki wykonawcze umożliwiające (wolne styki przełączalne) sygnalizowanie nastawianych wartości mierzonych parametrów lub automatyczne sterowanie innymi podstacjami urządzeniami mogącymi przeciwdziałać tym przekroczeniom. Oznacza to, że urządzenie takie będzie mogło spełniać odpowiednie funkcje zabezpieczające i sterownicze, umożliwiające realizowanie określonego dla danej, bezobsługowej podstacji trakcyjnej automatycznego sterowania pracą ich zespołów prostownikowych, jak i skutecznego zabezpieczenia prostowników diodowych tych zespołów [2].

Należy nadmienić, iż uzyskanie pozytywnych wyników pracy eksploatacyjnej zespołów prostownikowych ZP-1,7/3,3 na podstacji trakcyjnej Huta Zawadzka (CMK), których prostowniki diodowe są wyposażone w opisane urządzenia pomiarowe MPZ-10, może stanowić techniczne uzasadnioną podstawę do opracowań odpowiednich systemów wykorzystujących te urządzenia do automatycznego sterowania



Rys. 4. Schemat blokowy urządzenia pomiarowego MPZ-10

i skutecznego zabezpieczenia zespołów prostownikowych w projektach modernizacyjnych lub nowo budowanych bezobsługowych i ze zdalnym sterowaniem podstacjach trakcyjnych. Propozycja ta w całości lub w określonym zakresie może dla osiągnięcia wynikającej z jej stosowania określonych celów oszczędnościowych lub ruchowych znaleźć praktyczne zastosowanie zarówno w komunikacji kolejowej (PKP), jak i miejskiej (tramwaj, trolejbus, metro).

Podsumowanie

Opracowane w Instytucie Elektrotechniki, zgodne z opisanymi wymogami, nowe 12-pulsowe zespoły prostownikowe dla kolejowych podstacji trakcyjnych zasilanych średnim napięciem (SN – 15 kV lub 20 kV) oznaczone typem ZP-1,7/3,3-SN, analogicznie jak pracujące już zespoły zasilane napięciem WN – 110 kV, będą wyznaczonowane w dwóch klasach przeciążalności prądowej (kpp), mianowicie (rys. 5) w:

- III kpp według PN-IEC 146-1-1+AC o prądzie znamionowym 1700 A;

- Vlb według IEC 84 z 1957 r. o prądzie znamionowym 1100 A.

Transformatory prostownikowe dla tych zespołów o układzie połączeń Yd11yo, znamionowej mocy 6,3 MVA i napięciu zasilania 3×15 kV lub 3×20 kV, przy gwarantowanym napięciu zwarcia 6/6 %, po stronie górnego napięcia (GN) będą mieć 13 zaczepek umożliwiających regulację napięcia w zakresie od $-7,5\%$ do $+7,5\%$ co $1,25\%$, przy czym w zależności od potrzeb zamawiającego będą mogły one być wyposażone w przełączniki zaczepek:

- pod obciążeniem o 13 pozycjach z pełną regulacją napięcia w zakresie od $-7,5\%$ do $+7,5\%$ co $1,25\%$;

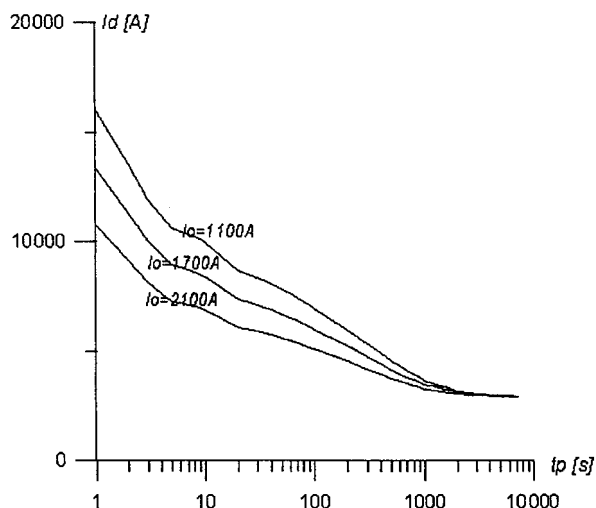
- beznapięciowe typowe o 5 lub specjalnie o 7 pozycjach, z regulacją napięcia w uzgodnionym zakresie i skoku, jak na przykład dla:

- 7-pozycyjnego w zakresie od $-7,5\%$ do $+7,5\%$ co $2,5\%$ lub od -5% do $+2,5\%$ co $1,25\%$;

- 5-pozycyjnego w zakresie od $-7,5\%$ do $+7,5\%$ co $3,75\%$ lub od -5% do $+5\%$ co $2,5\%$.

□

Autorzy
mgr inż. Eugeniusz Korzycki,
mgr inż. Stanisław Sakowicz,
mgr inż. Henryk Świątek,
doc. dr inż. Krzysztof Zymmer
Instytut Elektrotechniki
Zakład Przekształtników Mocy,
ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa



Rys. 5. Przeciążalność robocza prostownika PD-1,7/3,3

Literatura

- [1] Korzycki E.: *Przekształtniki diodowe 12-fazowe dla potrzeb trakcji elektrycznej PKP. Zalety oraz wynikające nowe zagadnienia techniczne*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 136/1985.
- [2] Korzycki E., Ustubski J.: *Trakcyjne zespoły prostownikowe o pulsacji 12-fazowej i napięciu 3 kV*. Wydawnictwo Centralnego Biura Projektowo-Badawczego Budownictwa Kolejowego. Warszawa 1987.
- [3] Korzycki E.: *Ocena wpływu podstacji trakcyjnych z przekształtnikami diodowymi na odkształcenie krzywej napięcia w energetycznych liniach zasilających*. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Jakość energii elektrycznej”. Politechnika Łódzka, Spółka 25–27.09.1991 r.
- [4] Korzycki E., Sakowicz S.: *Analiza wpływu sposobu zasilania trakcyjnych zespołów prostownikowych na wybrane ich parametry*. Konferencja Naukowo-Techniczna Politechniki Krakowskiej pt.: Oddziaływanie trakcji elektrycznej na środowisko, Zakopane 14–16.10.1999 r.
- [5] Korzycki E., Świątek H., Zymmer K.: *Trakcyjny zespół prostownikowy z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV*. VIII Sympozjum Politechniki Śląskiej – Podstawowe problemy energoelektroniki i elektromechaniki PPEE'1999. Wisła, 22–25.03.1999 r.
- [6] Korzycki E., Skonieczny S.: *Urządzenie pomiarowe MPZ-10 jako element sterowniczo-zabezpieczający trakcyjnych zespołów prostownikowych*. IX Sympozjum Politechniki Śląskiej – PPEE'2000. Wisła 11–14 grudnia 2000 r.
- [7] Korzycki E., Sakowicz S.: *Nowe 12-pulsowe zespoły prostownikowe dla podstacji trakcyjnych zasilanych średnim napięciem SN-15 kV lub 20 kV*. Dokumentacja Instytutu Elektrotechniki, nr arch. 3/2001.