

Elektrownia fotowoltaiczna w bezpośredniej współpracy z trakcją miejską

Photovoltaic power plant in direct cooperation with urban traction systems

¹ mgr inż. Paweł Milewski, Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o., ul. Hutnicza 3, 81–212 Gdynia, Politechnika Gdańska, Szkoła Doktorska Wdrożeniowa, ul. Narutowicza 11, 80–233 Gdańsk, E-mail: pawel.milewski@arex.pl

² mgr inż. Paweł Mordawski, Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o., ul. Hutnicza 3, 81–212 Gdynia, E-mail: pawel.mordawski@arex.pl

adres do korespondencji: pawel.milewski@arex.pl

Streszczenie: Artykuł opisuje wdrożenie elektrowni PV o mocy 499,5 kWp do trakcji trolejbusowej. Skupiono się na praktycznym zastosowaniu systemu zarządzania energią (SEMS) oraz analizie jego architektury, obejmującej stację przekształtnikową i zespoły paneli PV. Omówiono tryby pracy, uwzględniając m.in. możliwości realizacji zasilania potrzeb własnych. Pokazano trudności techniczne wynikające z bezpośredniej współpracy z trakcją miejską. Dokonano analizy zmienności napięcia trakcji. Na drodze weryfikacji danych eksploatacyjnych potwierdzono zasadność wdrożenia.

Słowa kluczowe: trolejbusy, trakcyjna elektrownia PV, SEMS, zasobniki energii

Abstract: The article presents the implementation of a 499.5 kWp photovoltaic power plant for trolleybus traction. It focuses on the practical use of a Smart Energy Management System (SEMS) and the analysis of its architecture, including the converter station and PV arrays. Operating modes are discussed, including the ability to supply auxiliary loads. Technical challenges of direct integration with the urban traction system are addressed. Traction voltage variability is analyzed, and the implementation is validated through operational data.

Keywords: trolleybuses, traction PV power plant, SEMS, energy storage systems

Wstęp

Postęp technologiczny powiązany z działaniami w zakresie bezemisyjnych lub niskoemisyjnych środków transportu, otwiera kolejne perspektywy, które do niedawna wykraczały poza możliwości techniczne lub były nieuzasadnione ekonomicznie. Ponadto sytuacja na rynku energii elektrycznej sprawia, że samorządy oraz powiązane z nimi przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej szukają sposobu na obniżenie kosztów zakupu energii elektrycznej. Jednym z takich sposobów jest zastosowanie systemu zarządzania energią (SEMS, ang. *smart energy management system*) [1]. Odpowiednio skalując taki system, wykorzystując ogniwa fotowoltaiczne, możliwe jest skuteczne zasilenie odcinka trakcji miejskiej. Pozwala to znacząco obniżyć jeden z głównych kosztów przedsiębiorstwa transportu miejskiego wykorzystującego tabor elektryczny.

Istniejące rozwiązania elektrowni fotowoltaicznych wykorzystujące układy przekształtnikowe DC-AC, podłączone do sieci dystrybucyjnej, borykają się z coraz częstszymi przymusowymi odłączeniami. Powiązane jest to z obniżonym zapotrzebowaniem na energię elektryczną i koniecznością zachowania zdolności regulacyjnych systemu [2]. Proponowane rozwiązanie, wykorzystu-

jące przekształtniki DC-DC, jest pozbawione tej istotnej wady. Zastosowane transformatorowe przekształtniki przekazują energię elektryczną pozyskaną z paneli PV bezpośrednio do określonego odcinka miejskiej sieci trakcyjnej. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie poboru energii elektrycznej z podstacji trakcyjnej, bez konieczności ingerencji w układ pomiarowo-rozliczeniowy dostawcy energii. Elektrownię fotowoltaiczną o mocy ok. 0,5 MWp, umożliwiającą redukcję kosztów zakupu energii elektrycznej na potrzeby trakcji trolejbusowej, wdrożono na terenie zajezdni Przedsiębiorstwa Komunikacji Trolejbusowej w Gdyni Leszczynkach.

Opis wdrożonego systemu

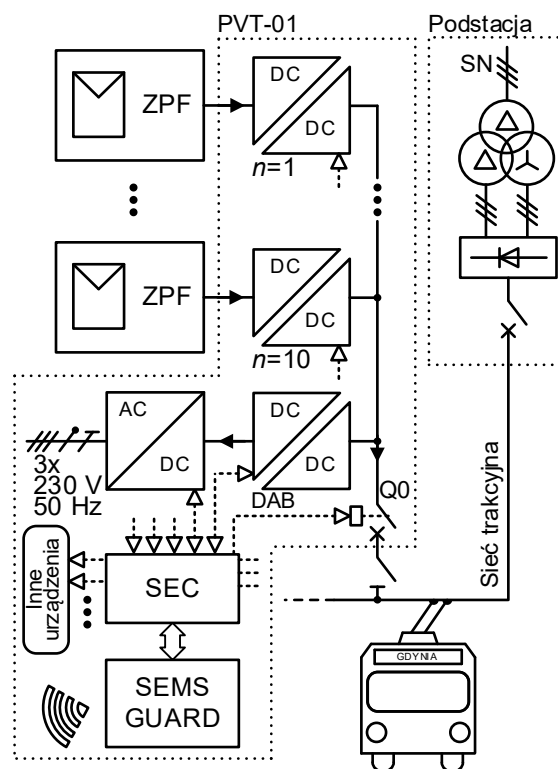
Podstawową częścią trakcyjnej elektrowni fotowoltaicznej jest przekształtnikowa stacja PVT-01 zabudowana w kontenerze 15-stopowym (rys. 1). Stacja została wyposażona w 12 jednokierunkowych transformatorowych przekształtników DC-DC, każdy o mocy znamionowej 50 kW.

Urządzenia te zostały wykonane w topologii pełnego mostka sterowanego za pomocą przesunięcia fazowego (PSFB, ang. *phase-shifted full bridge*). Osia-



Rys. 1. Kontenerowa stacja przekształtnikowa PVT-01 (lewy) oraz główne przekształtniki w standardzie rack 19" (prawy)

gnięcie znamionowej mocy stacji wynoszącej 500 kW jest możliwe przy pracy 10 modułów. Jednakże w celu zapewnienia ciągłości pracy systemu przyjęto redundancję $n+2$. Przekształtniki PV zostały wyposażone w funkcję śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPPT, ang. *maximum power point tracking*). Uproszczony schemat trakcyjnej elektrowni fotowoltaicznej PVT-01 przedstawiono na rysunku 2. Konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną realizowana jest przez 10 zespołów paneli fotowoltaicznych (ZPF). Każdy ZPF składa się z 5 łańcuchów po 18 paneli o mocy 555 Wp. Łączna liczba paneli wynosi 900, co pozwala osiągnąć moc 499,5 kWp w standardowych warunkach testowych (STC, ang. *standard test conditions*) [3]. ZPF podzielono na dwie grupy w zależności od ich orientacji względem kierunków świata. Siedem zespołów ustawiono w kierunku południowo zachodnim, natomiast trzy skierowano na południowy wschód. Takie rozmieszczenie pozwala na lepsze wykorzystanie dostępnego nasłonecznienia w ciągu doby, zwiększając efektywność pracy instalacji. Stacja PVT-01, poza przetwarzaniem energii słonecznej, zapewnia również zasilanie potrzeb własnych. W tym celu została wyposażona w dodatkowy przekształtnik DAB oraz aktywny przekształtnik sieciowy DC-AC. Przekształtniki DAB i DC-AC pozwalają wytworzyć wydzieloną sieć AC 3×230 V 50 Hz na potrzeby podstawowego zasilania pomocniczego stacji. Stacja ma również możliwość poboru energii z sieci elektroenergetycznej z wykorzystaniem ręcznego przełącznika źródła zasilania. W celu zapewnienia ochrony dodatkowej przed porażeniem prądem elektrycznym zastosowano wyłączniki różnicowoprądowe. Wymusiło to konieczność rekonfiguracji zasilania potrzeb własnych w trybie podstawowym. Rekonfiguracja ta polega na wytworzeniu lokalnej sieci TN-S poprzez połączenie przewodu neutralnego do przewodu ochronnego przekształtnika sieciowego. Dodatkowo układ został wyposażony w system bezprzerwowego zasilania. Takie rozwiązanie gwarantuje ciągłość zasilania wrażliwych układów: komputera SEMS GUARD oraz mikroprocesorowego systemu wykonawczego SEC. Zasilanie



Rys. 2. Uproszczony schemat trakcyjnej elektrowni fotowoltaicznej

gwarantowane zabezpiecza również stację przed chwilowymi brakami ciągłości zasilania w sieci trakcyjnej.

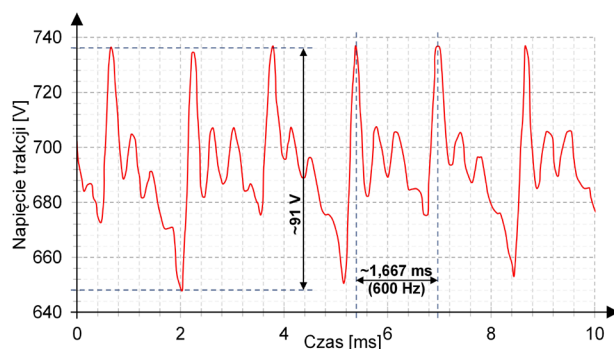
Stacja kontenerowa może realizować trzy tryby pracy (TP): PV na sieć trakcyjną (PV2TG), PV na kontener (PV2C) oraz sieć trakcyjna na kontener przekształtnikowy (TG2C). W trybie PV2TG energia z ZPF zasilą odcinek traktacji elektrycznej oraz zapewnia zasilanie pomocnicze podstawowe. Jest to domyślny tryb dzienny. W trybie PV2C wyłącznik liniowy Q0 jest rozarty, a energia z ZPF pokrywa zapotrzebowanie zasilania pomocniczego. W ostatnim trybie TG2C zasilanie pomocnicze stacji przekształtnikowej pochodzi z podstacji trakcyjnej. Jest to podstawowy tryb pracy nocnej systemu. Na rysunku 2 strzałkami oznaczono kierunek przepływu energii elektrycznej w podstawowym trybie pracy układu – PV2TG. Stacja przekształtnikowa charakteryzuje się maksymalną wartością prądu wyjściowego 910 A. Zakres napięcia traktacji przy której stacja zachowuje pełną funkcjonalność wynosi 550–800 V.

Zastosowanie opracowanej warstwy programowej systemu SEMS umożliwia nie tylko obserwację zarejestrowanych danych, ale także podgląd danych bieżących oraz zmianę parametrów pracy, takich jak: graniczna wartość napięcia, do której przekształtniki fotowoltaiczne przekazują energię elektryczną do traktacji, minimalna wartość nasłonecznienia wymagana do działania systemu czy szczegółowe parametry algorytmu MPPT. Sterowanie oraz wizualizacja możliwa jest lokalnie za pomocą pulpitu operatorskiego oraz z wykorzystaniem aplikacji internetowej.

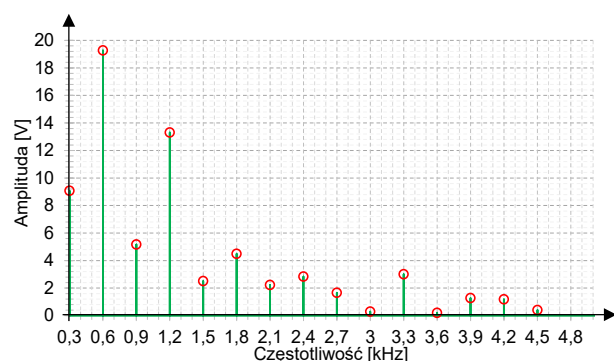
Zmienność napięcia trakcji miejskiej

Podstawowa trudność w realizacji dynamicznego algorytmu MPPT powiązana jest ze znacznymi zmianami napięcia trakcji. Można przy tym wyróżnić trzy składowe tego napięcia: stałą, zmienną i przemienią. Składowa zmienna związana jest ze spadkiem napięcia spowodowanym wzrostem obciążenia, w szczególności podczas rozruchu, oraz ze wzrostem napięcia wynikającym z hamowania elektrodynamicznego pojazdów trakcyjnych. Wzrost składowej zmiennej odpowiada w ogólności za chwilowe ograniczenie generacji w związku z osiągnięciem maksymalnej wartości napięcia wynikającej z nastaw. Istotniejszym problemem, znajdującym odzwierciedlenie w warstwie sprzętowej, jest składowa przemieniana. Składowa ta związana jest z pracą prostownika 12-pulsowego w podstacji trakcyjnej. Rysunek 3 przedstawia zarejestrowany przebieg napięcia trakcyjnego na zaciskach głównych stacji PVT-01 przy otwartym wyłączniku liniowym Q0. Widoczna jest na nim składowa 600 Hz, typowa dla prostownika 12-pulsowego, oraz tłumiony rezonans spowodowany obecnością rozproszonych elementów biernych linii trakcyjnej. Widmo przebiegu napięcia trakcyjnego (rys. 3) pokazano na rysunku 4. Najbardziej uwydatnione są składowe o częstotliwości 300, 600, 900, 1200 Hz.

Na przebiegu napięcia trakcyjnego (rys. 3) zaznaczono wartość międzyszczytową wynoszącą ok. 91 V. W czasie procesu uruchamiania stacji kontenerowej, przy wyłączonym wyłączniku Q0, rejestrowano wartości składowej przemiennej wynoszące nawet 120 V. Tak znaczna wartość tętnień napięcia stwarza istot-



Rys. 3. Przebieg napięcia trakcyjnego



Rys. 4. Widmo przebiegu napięcia trakcyjnego (rys. 3)

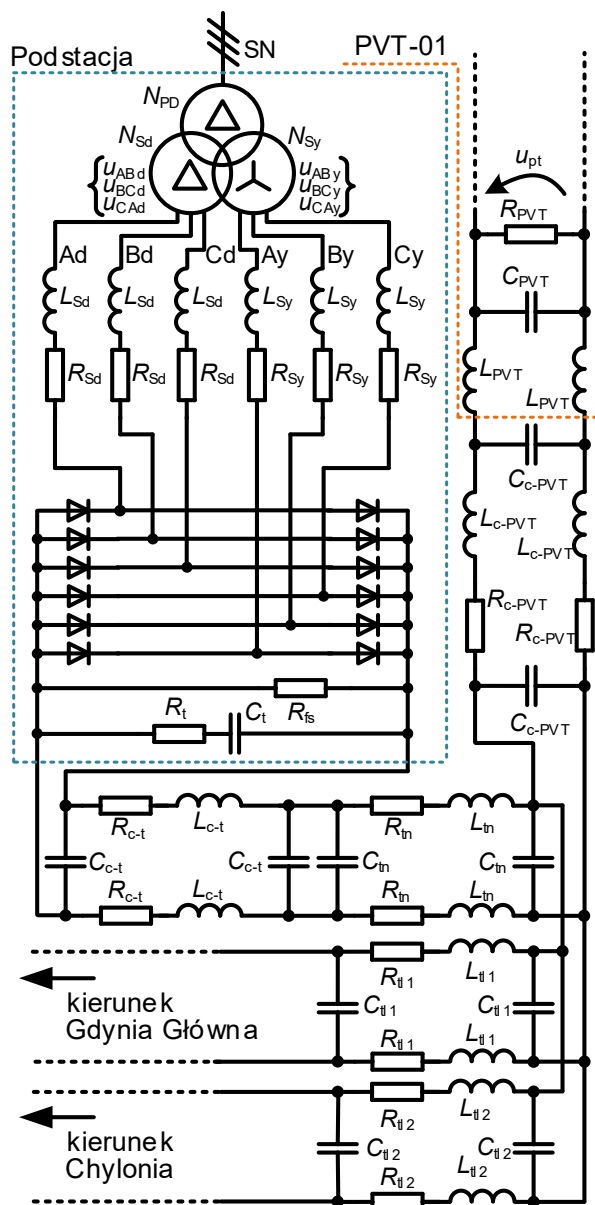
ne wyzwanie w realizacji algorytmu sterownia przekształtników DC-DC, w tym dynamicznego algorytmu MPPT. Utrudniają to także występujące rezonanse. Do ich szczegółowej analizy na podstawie parametrów elementów podstawicy oraz parametrów sieci trakcyjnej wykorzystano pakiet symulacyjny PSIM. W pierwszym etapie określono schemat połączeń podstawicy Grabówek z PVT-01 oraz pozostałymi odcinkami sieci trakcyjnej w kierunku Gdynia Główna i Chylonia. Następnie opracowano model obwodowy, w którym zastosowano schemat zastępczy linii kablowych oraz trakcji elektrycznej w postaci rozszerzonego modelu π [4]. Dodatkowo określono uproszczony schemat podstawicy trakcyjnej Grabówek. Należy podkreślić, że problematyka opracowania dokładnego modelu odwzorowującego przebieg z rysunku 3 nie jest prosta ze względu na rozległość sieci trakcyjnej oraz jej złożoność. Trakcja trolejbusowa nie jest symetryczna, co oznacza, że odcinki biegunów dodatniego i ujemnego mają różne długości. Dodatkowo zasilanie danego odcinka z podstawicy jest realizowane przez kilka par przewodów, które są podłączone do trakcji w punktach oddalonych od siebie o kilkadziesiąt metrów. Wszystkie te czynniki powodują powstawanie przestrzennych pętli, które przekładają się na znaczną wartość indukcyjności w schemacie zastępczym. Rozpatrywany model symulacyjny trolejbusowej sieci trakcyjnej przedstawiono na rysunku 5. Jednym z kluczowych działań niezbędnych do określenia przybliżonego modelu obwodowego było wyznaczenie jednostkowej indukcyjności (L_m') oraz jednostkowej pojemności (C_m'). W Gdyni trakcja wykorzystuje przewody Djg-100, a ich rozstaw na prostych odcinkach wynosi około 0,5 m. W celu określenia tych parametrów przeprowadzono symulację polową w programie FEMM, uzyskując następujące wartości: $L_m' = 6,1$ mH/km oraz $C_m' = 1,8$ nF/km. Indukcyjności rozproszenia oraz rezystancje uzwojeń transformatora zostały przeniesione na stronę wtórną, a następnie zostały przeliczone w formie parametrów zastępczych szeregowego obwodu RL. Gałąź poprzeczna transformatora została pominięta z uwagi na pomijalny wpływ. Punkt pomiaru napięcia u_{pt} (rys. 5) wskazuje miejsce pomiaru, w którym zarejestrowano przebieg z rysunku 3. Składowa o częstotliwości 300 Hz wynika z różnicy napięć w poszczególnych częściach prostownika, podłączonych do strony wtórnej transformatora w układzie gwiazdy (y) oraz trójkąta (d). Istotny jest również wpływ różnic w wartościach indukcyjności rozproszenia tych części transformatora. Wiąże się to różnicami przekładni zwojowych Dy transformatora trakcyjnego.

W analizowanym modelu symulacyjnym stosunek wartości amplitudy międzyfazowego napięcia układu d do układu y wynosi ok. 0,9963. Ta niewielka różnica wartości jest wzmacniana przez układ o wielu często-

tliwościach rezonansowych. Na rysunku 6 przedstawiono przebieg napięcia u_{pt} uzyskany z symulacji modelu (rys. 5) o parametrach zestawionych w tabeli 1. Wielkości mające główny wpływ na tętnienia napięcia o tak znacznej wartości to: indukcyjności zastępcze transformatora, pojemność wyjściowa prostownika, indukcyjność trakcji, indukcyjności linii kablowych i dławika sprzęgającego oraz pojemność kondensatora wejściowego PVT-01.

Wspomniana składowa zmienna, powiązana z hamowaniem elektrodynamicznym, ruszaniem pojazdów trakcyjnych oraz przebiegami, powoduje dodatkowe wyzwania techniczne. Wynikają one głównie z konieczności realizacji procesu łączenia przekształtników do trakcji oraz ich bezawaryjnego zainicjowania.

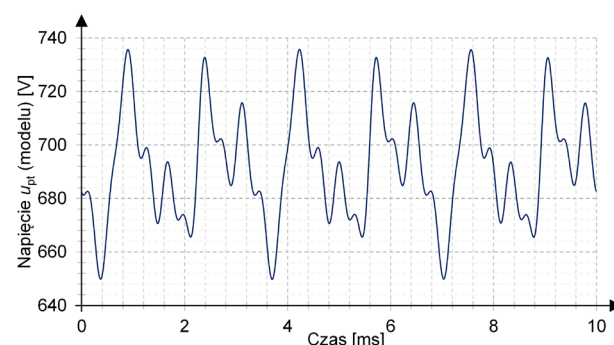
W celu poprawy warunków przyłączenia przekształtników zdecydowano o zainstalowaniu dławika



Rys. 5. Analizowany model symulacyjny sieci trakcyjnej

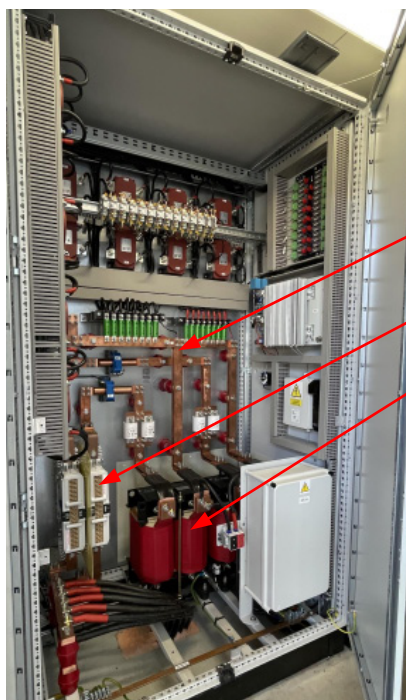
Tabela 1. Wartości parametrów modelu zastępczego wraz z opisem

Parametr	Wartość	Opis
L_{sd}	910 μ H	zastępcza indukcyjność i rezystancji części transformatora w układzie trójkąta (d)
R_{sd}	3 m Ω	
L_{sy}	680 μ H	zastępcza indukcyjność i rezystancji części transformatora w układzie gwiazdy (y)
R_{sy}	1,5 m Ω	
N_{pd}/N_{sd}	29,85	przekładnia zwojowa Dd
N_{pd}/N_{sy}	17,30	przekładnia zwojowa Dy
R_t	0,22 Ω	rezystor tłumiący
C_t	9,9 μ F	kondensator wyjściowy prostownika (tłumiący)
R_{fs}	1,5 k Ω	rezystor rozładowczy (element obwodu tłumiącego)
C_{c-t}	35 nF	kabel podstacja-trakcja
R_{c-t}	15 m Ω	
L_{c-t}	25 μ H	
C_{in}	0,3 nF	trakcja (odcinek podstacja-PVT-01)
R_{in}	30 m Ω	
L_{in}	1190 μ H	
C_{c-PVT}	40 nF	kabel trakcja-PVT-01
R_{c-PVT}	3 m Ω	
L_{c-PVT}	20 μ H	
L_{PVT}	100 μ H	dławik sprzęgający PVT-01
C_{PVT}	1,43 μ F	kondensator PVT-01
R_{PVT}	10 k Ω	rezystor rozładowczy
C_{il1}, C_{il2}	2 nF	pozostałe odcinki trakcji podłączone do podstacji
R_{il1}, R_{il2}	180 m Ω	
L_{il1}, L_{il2}	6 mH	



Rys. 6. Przebieg napięcia u_{pt} uzyskany z symulacji modelu

ków sprzęgających na obu biegunach o indukcyjności 100 μ H każdy. Na rysunku 7 pokazano widok głównej rozdzielni trakcyjnej stacji kontenerowej PVT-01 zawierającą m.in. wyłącznik liniowy Q0, dławiki sprzęgające oraz główne szyny zbiorcze, do których podłączane są przekształtniki.



Główne szyny
zbiorcze
Wyłącznik
liniowy Q0
Dławiki
sprężające

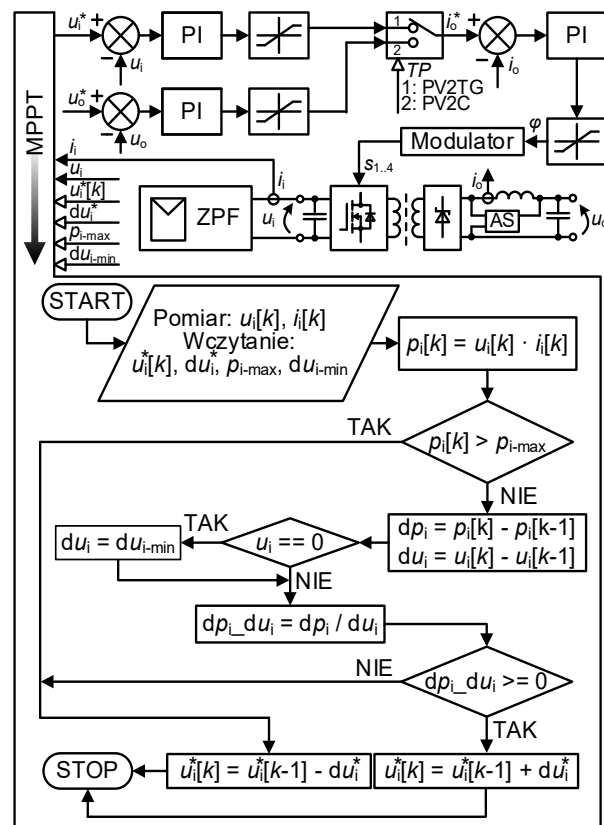
Rys.7. Rozdzielnia trakcyjna stacji PVT-01

Przekształtniki fotowoltaiczne

Przekształtniki fotowoltaiczne o oznaczeniu modelowym PSFB-01 zostały zaprojektowane z wykorzystaniem modułów tranzystorowych SiC oraz diod MPS SiC, co pozwoliło osiągnąć sprawność maksymalną 98,4%. W związku z koniecznością pracy układu zarówno z siecią trakcyjną (PV2TG) w trybie prądowym, jak i w trybie napięciowym (PV2C), zdecydowano się na zastosowanie rekonfigurowanego układu regulacji (rys. 8). Tryb pracy (*TP*) zadawany jest z systemu nadrzędnego (SEC). W trybie PV2TG zmienną podstawową jest wartość zadana napięcia u_i . Zmienna ta wyznaczana jest na podstawie algorytmu MPPT „zaburz i obserwuj” [5]. Kolejną istotną grupę stanowią parametry związane z ograniczeniami przekształtnika oraz wartości zadane przez system nadrzędny. Zostały one uwzględnione w limiterze, umieszczonym za regulatorem prądu, i obejmują: graniczną wartość prądu wyjściowego, ograniczenie mocy wyjściowej oraz maksymalne napięcie wyjściowe. W trybie PV2C zadawana jest stała wartość napięcia głównej szyny DC stacji. W tym trybie algorytm MPPT nie jest aktywowany, co nie ma istotnego wpływu na działanie systemu, ponieważ moc potrzeb własnych wynosi jedynie 1–3 kW.

Analiza przebiegów rzeczywistych

Stacja PVT-01, zlokalizowana na terenie PKT Gdynia, została uruchomiona w czerwcu 2024 roku. Do lutego 2025 roku wygenerowała około 250 MWh energii. Ze względu na niepełny rok pracy systemu dokładna roczna produkcja energii nie jest jeszcze znana. Możliwe jest jednak jej oszacowanie na podstawie archiwal-



Rys. 8. Układ regulacji przekształtnika fotowoltaicznego oraz schemat blokowy wykorzystanego algorytmu MPPT typu „zaburz i obserwuj”, gdzie:

u_i – zmierzone napięcie wyjściowe ZPF, podłączone do baterii kondensatorów przekształtnika, u_i^* – wartość zadana napięcia u_i , przekazywana do regulatora napięcia wyjściowego ZPF, u_o – zmierzone napięcie wyjściowe przekształtnika, u_o^* – wartość zadana napięcia u_o , wykorzystywana w trybie napięciowym, i_i – zmierzone natężenie prądu ZPF, i_o – zmierzone natężenie prądu wyjściowego przekształtnika, i_o^* – wartość zadana prądu i_o , ustalana przez regulator napięcia, *TP* – tryb pracy przekształtnika, $s_{1,4}$ – sygnały bramkowe pełnego mostka przekształtnika, φ – kąt przesunięcia fazowego PSFB, k – krok iteracji (próbki czasowej), du_i^* – przyrost wartości zadanej u_i^* , p_{i-max} – moc maksymalna ZPF, du_{i-min} – minimalna wartość przyrostu napięcia u_i , AS – aktywny tłumik przebieg (ang. *active snubber*).

nych danych dotyczących nasłonecznienia w Gdyni [8]. Prognozowana roczna produkcja energii wynosi około 490 MWh. Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi nasłonecznienia, mocy, natężenia prądu stacji, generowanej energii dziennie, napięcia trakcji oraz łącznej energii wygenerowanej. Pierwsze pięć przebiegów zostało zarejestrowanych dnia 26.06.2024 r. Tego dnia łączna energia wygenerowana to ok. 2,7 MWh przy maksymalnym nasłonecznieniu ok. 910 W/m². Podobnie jak w przypadku rysunku 9 widoczna jest znaczne chwilo-

we zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz znaczną zmienność napięcia trakcyjnego. Na podstawie przebiegu napięcia trakcyjnego możliwe jest oszacowanie momentu rozpoczęcia procedury prekondycjonowania pojazdów trakcyjnych przed rozpoczęciem pierwszych kursów – ok. godz. 4:00. Jednak generowanie energii możliwe było dopiero po osiągnięciu odpowiedniego nasłonecznienia (ok. 50 W/m^2) – ok. godz. 5:20.

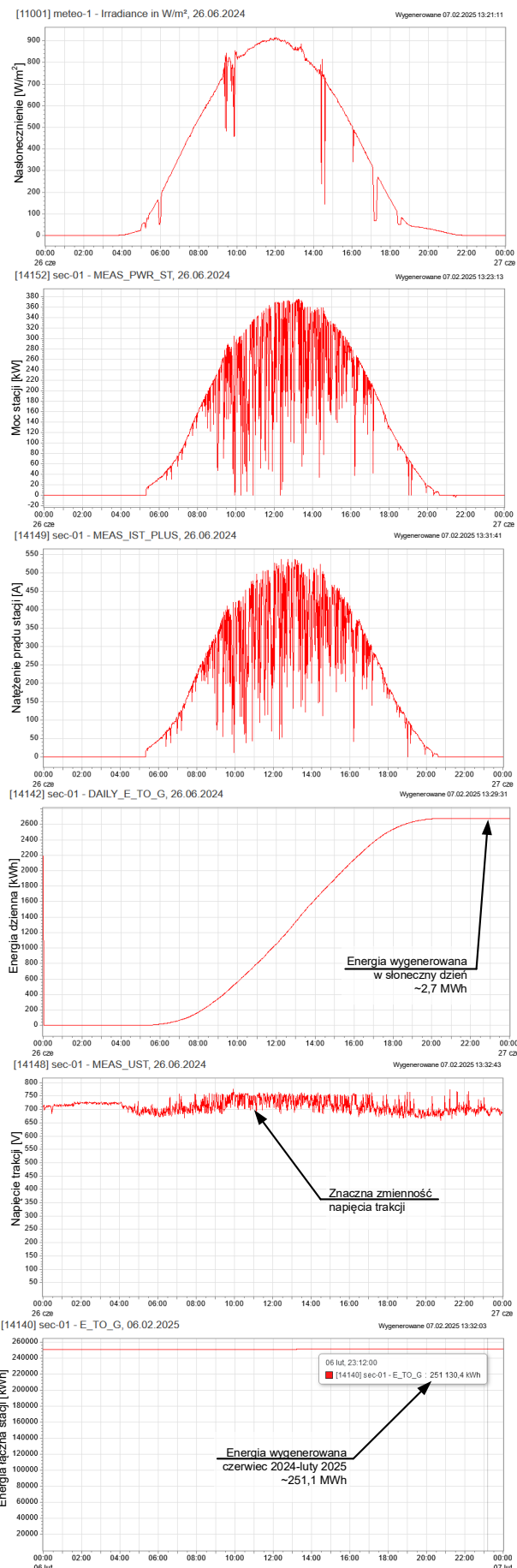
Podsumowanie

W odróżnieniu od elektrowni PV podłączonej do sieci elektroenergetycznej po stronie napięcia przemienego, zaproponowane rozwiązanie – mimo zalet związanych z wyższą sprawnością toru przetwarzania oraz niezależnością od nierynkowych wyłączeń źródeł PV – ma również pewną wadę. Energia ze stacji jest przekazywana jedynie w chwili przejazdu trolejbusu przez zasilany odcinek trakcji. W słoneczny dzień, gdy na danym fragmencie sieci nie ma pojazdów trakcyjnych, a zapotrzebowanie na energię wynika jedynie z potrzeb własnych stacji, istotna część energii promieniowania słonecznego pozostaje niewykorzystana. Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi nasłonecznienia oraz mocy chwilowej, 15-minutowej i teoretycznej, wynikającej z potencjału PVT-01, na podstawie pomiarów ze stacji meteorologicznych.

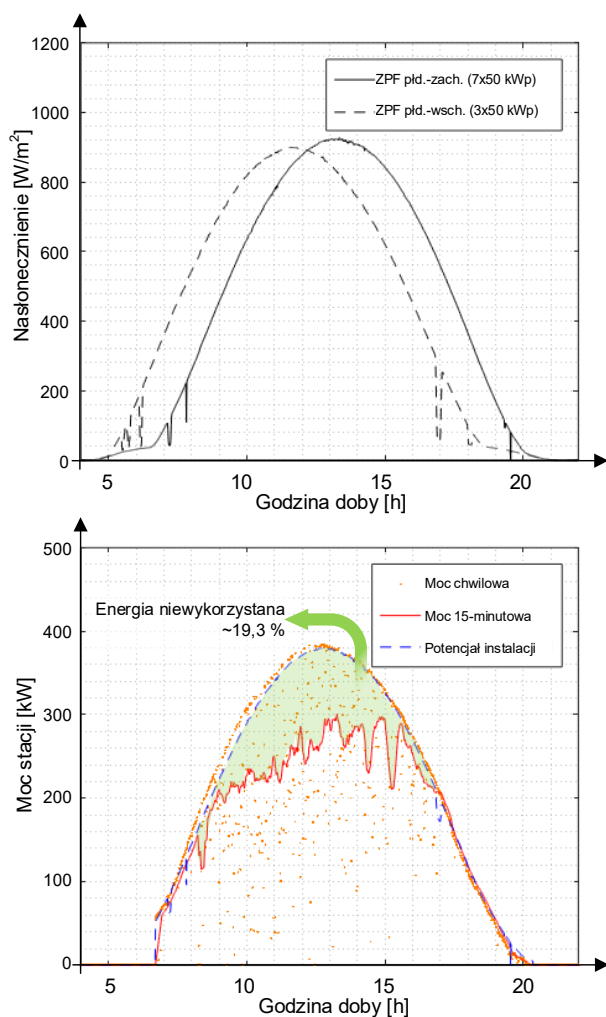
W tym słonecznym dniu energia uzyskana z instalacji wyniosła około 3117,1 kWh, z czego do trakcji przekazano około 2516,5 kWh. Różnica tych wartości, wynosząca 600,6 kWh, odpowiada energii niewykorzystanej, co stanowi około 19,3% energii teoretycznej. W związku z tym naturalnym kierunkiem rozwoju systemu SEMS jest jego rozbudowa o zasobnik energii, zgodnie z przyjętym kryterium doboru. Analiza przebiegu mocy chwilowej, pokrywającego się z mocą teoretyczną, wskazuje na znaczne, chwilowe zapotrzebowanie na moc na zasilanym odcinku trakcji, które przekracza teoretyczną moc stacji. Zbieżność obu przebiegów wynika z programowych limitów regulatorów prądu przekształtników.

Znając zapotrzebowanie na moc na danym odcinku trakcji (rys. 11), możliwy jest optymalny dobór magazynu energii pod względem technicznym i ekonomicznym. W tym celu konieczna jest analiza przebiegów mocy zarówno podstacji prostownikowej, jak i stacji przekształtnikowej w ujęciu rocznym. Rysunek 11 przedstawia archiwalny przebieg mocy chwilowej podstacji Grabówek, zarejestrowany przed uruchomieniem PVT-01, która stanowi główne źródło energii elektrycznej dla wspomnianego odcinka trakcji.

Analiza przebiegu mocy uzyskanego w okresie letnim wskazuje, że chwilowe zapotrzebowanie na energię z podstacji może osiągać nawet 1,35 MW. W odniesieniu do godzin pracy elektrowni (6:00–20:00, rys. 10) w mie-



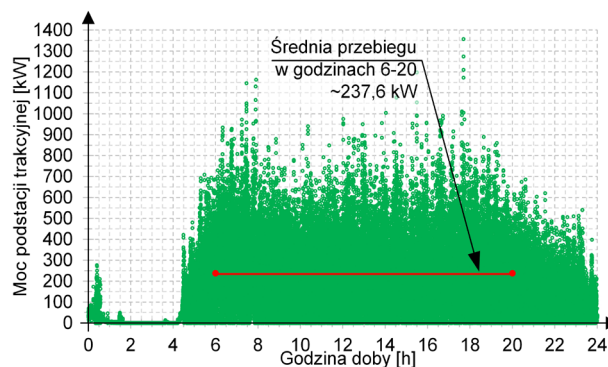
Rys. 9. Dobowe przebiegi nasłonecznienia, mocy, natężenia prądu, generowanej energii dziennej, napięcia trakcji oraz łącznej energii wygenerowanej stacji



Rys. 10. Dobowe przebiegi nasłonecznienia (dwóch grup zespołów paneli fotowoltaicznych), mocy chwilowej, 15-minutowej oraz teoretycznej (potencjał instalacji)

sięcach letnich obliczono średnią wartość mocy chwilowej podstacji, która wynosi 237,6 kW. Biorąc pod uwagę zarówno szczytowe wartości mocy, jak i wartość średnią, zaleca się dobór magazynu energii nie pod kątem maksymalizacji zgromadzonej energii, lecz w celu pokrywania krótkotrwałych szczytowych poborów mocy. Takie kryterium doboru pozwoli na znaczną redukcję wymaganej pojemności magazynu. Wiąże się to jednak z koniecznością zastosowania zasobnika oraz pośredniczącego przekształtnika o wysokiej wydajności prądowej [6].

Bez znacznych zmian możliwe jest wykorzystanie zapasu mocy przekształtnika DC-AC, używanego do



Rys. 11. Dobowy przebieg mocy chwilowej stacji Grabówek (dane archiwalne – przed uruchomieniem stacji PVT-01)

zasilania potrzeb własnych stacji. Może on zasilać budynki zajezdni, zakłady remontowe oraz budynki administracyjne. Dodatkowo może być wykorzystywany do zasilania wolnych ładowarek AC dla samochodów elektrycznych. Rozbudowa systemu o magazyn energii dodatkowo uzasadniałaby takie rozwiązanie. Możliwe jest także zastosowanie dodatkowych przekształtników DC-DC w stacji. Umożliwiłoby to bezpośrednie zasilanie punktów stacji ładowania szybkiego DC [7]. Warto zauważyć, że nawet bez instalacji zasobnika energii dodatkowe obciążenie elektrowni pozwala na lepsze wykorzystanie dostępnej energii. Przekłada się to na obniżenie kosztów związanych z opłatami za energię. Przy wykorzystaniu sieci trakcyjnej system może zasilać infrastrukturę miejską, np. oświetlenie uliczne, przystanki, czy biletomaty.

Dynamiczne zmiany na rynku energii elektrycznej skłaniają samorządy oraz powiązane z nimi przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej do poszukiwania sposobów na obniżenie kosztów zakupu energii. Proponowany system bezpośredniego połączenia instalacji PV z trakcją miejską, eliminuje ryzyko nierynkowego odłączenia źródeł PV od sieci elektroenergetycznej. Rozwiązanie charakteryzuje się wysokim potencjałem wdrożenia również w innych systemach trakcyjnych, takich jak sieci tramwajowe czy metro.

Podziękowania dla PKT Gdynia za pomoc w realizacji artykułu.

Wybrane zagadnienia zostały opracowane w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy (VII edycja), umowa nr DWD/7/0363/2023.

Przyjęto: 04.05.2024, **zaakceptowano:** 01.07.2025,
opublikowano: 30.07.2025

LITERATURA

- [1] Milewski P., Buda T., Wiśniewski G., Zasobniki energii oraz dwukierunkowe przekształtniki energoelektroniczne jako podstawa systemu zarządzania energią (SEMS), *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 7, 178–180
- [2] Polskie Sieci Elektroenergetyczne, Redysponowanie nierynkowe, <https://www.pse.pl/instalacje-pv> (dostęp 07.02.2025 r.)
- [3] Teh C. J. Q., Drieberg M., Soeung S., Ahmad R., Simple PV Modeling Under Variable Operating Conditions, *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 96546–96560
- [4] Fan F., Wank A., Seferi Y., Stewart B. G., Pantograph Arc Location Estimation Using Resonant Frequencies in DC Railway Power Systems, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 4, Dec. 2021, pp. 3083–3095

- [5] ESRAM T., CHAPMAN P. L., Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, June 2007, pp. 439–449
- [6] Bartłomiejczyk M., Jarzębowicz L., Kohout J., Compensation of Voltage Drops in Trolleybus Supply System Using Battery-Based Buffer Station, *Energies*, vol. 15, no. 5, 2022, pp. 1629
- [7] Saadaoui A., Ouassaid M., Maaroufi M., Overview of Integration of Power Electronic Topologies and Advanced Control Techniques of Ultra-Fast EV Charging Stations in Standalone Microgrids, *Energies*, vol. 16, no. 3, 2023, pp. 1031
- [8] Geoportal Gdynia, nasłonecznienie dla działki 226201_1.0018.590 <https://gdynia.geoportal-krajowy.pl> (dostęp 18.02.2025 r.)