

# Prąd zwarciovv w generacji rozproszonej - uwarunkowania dla zabezpieczeń

Piotr Biczell – Politechnika Warszawska

## Streszczenie

W referacie przedstawiono zagadnienie udziału rozproszonych źródeł energii w wyłączaniu zwarć. Autor przeanalizował znane jednostki generacji rozproszonej pod kątem zdolności generacji prądu zwarciovv. Omówiono współczesne wymagania sieciowe w tym zakresie. Została przybliżona konstrukcja falownika energoelektronicznego pod kątem ograniczenia prądu wyjściowego. Zaprezentowano typowe wartości przeciążalności prądowej falowników na przykładzie UPS. Zasygnalizowano problematykę strategii wyłączania zwarć w układach, gdzie decydującą rolę pełnią źródła rozproszone, przede wszystkim elektrownie słoneczne i wiatrowe. Wskazano prowadzone prace badawcze w tym zakresie. Nakreślono potrzebę dalszych prac badawczych i konstrukcyjnych w sprawie.

## 1. Wstęp

Przyjęte rozwiązania techniczne, prawne i organizacyjne w elektroenergetyce wiążą się z ogólnie akceptowanym i opisanym w prawie paradygmatem o zasadach działania SEE. Nietrudno odnieść wrażenie, że nie jest to paradygmat, który ze swojej natury [15] powinien ulegać ewolucji, a raczej sztywna doktryna. Jej fundamentem jest przekonanie o konieczności:

- istnienia wielkich elektrowni i scentralizowanego wytwarzania,
- centralnego sterowania,
- istnienia sieci przesyłowej,
- przepływu energii od podsystemu najwyższych napięć do niskiego.

Zdaniem autora stoimy w przededniu powrotu od doktryny do paradygmatu i ewolucyjnym przededefiniowaniu tego ostatniego. Celem jest ochrona klimatu, dekarbonizacja, poprawa sprawności, sterowalności, niezawodności, otwarcie rynku – duża zmiana w stosunku do obecnej sytuacji. Tylko od nas zależy, jak i na ile gwałtownie to się dokona. Świadczą o tym niezbiecie między innymi następujące przesłanki:

- minimum jednostkowego kosztu inwestycyjnego przesunięte ze źródeł wielkoskalowych do źródeł małej mocy [19],
- możliwość automatycznego i rozproszonego sterowania,
- wysoka sprawność wytwarzania rozproszonego,
- tendencje decentralizacyjne,
- zmiana świadomości społeczeństwa i dążenie do wolności energetycznej oraz techniczno-ekonomiczna możliwość realizacji tego postulatuu.

W pracy [16] Kocot rozważa scenariusze: kontynuacji i innowacyjny rozwoju KSE do roku 2020. Choć z perspektywy roku powstania publikacji ten drugi wydawał się postępowy, to obecnie należy go uznać również za zachowawczy. Dynamika zmiany może być bowiem zwiększona, a czas przybliżony nie tylko przez – wydaje się niezamierzone – działania rządu, które spowodowały 2019 r. wzrost mocy generowanej przez elektrownie przemysłowe (głównie gazowe agregaty kogeneracyjne o 0,5 punktu procentowego rok do roku [5]), ale również przyspieszające procesy dekarbonizacji [6]. Tak, czy inaczej, wcześniej, czy później, czeka nas generalna zmiana paradygmatu działania systemu elektroenergetycznego. Obecnie [20] za rewolucyjną można uznawać ideę elektroprosumeryzmu, czyli szerokiego udziału prosumentów w zaspokajaniu elektroenergetycznych potrzeb odbiorców.

Wśród dogmatów będących podstawą funkcjonowania scentralizowanego systemu elektroenergetycznego jest ten mówiący o konieczności wykorzystywania mocy zwarciovv systemu do aktywacji zabezpieczeń. Problemy z jej dostarczeniem są dla wielu wystarczającym powodem do systemowego ograniczania rozwoju generacji rozproszonej i tworzenia zbilansowanych podsystemów, klastrów czy lokalnych obszarów bilansowania. W dalszej części artykułu przedstawię tezy, które mają skłonić czytelnika do rozważenia innych scenariuszy radzenia sobie ze zwarciami i podjęcia prac badawczych, w tym zakresie.

## 2. Źródła generacji rozproszonej i ich zdolność zwarciorowa

W wypadku generacji rozproszonej katalog dostępnych technologii wytwarzania energii elektrycznej jest bardzo szeroki. Literaturze, np. [1, 9, 11, 21] podaje się następujące:

- elektrownie słoneczne, głównie fotowoltaiczne,
- elektrownie wiatrowe,
- turbiny i mikroturbiny gazowe,
- małe elektrownie wodne,
- agregaty prądotwórcze, opalane różnym paliwem,
- ogniwa paliwowe.

Wymienione źródła można podzielić na kilka grup, w zależności od typu generatora:

- z generatorami synchronicznymi:
  - małe elektrownie wodne,
  - turbiny gazowe,
  - agregaty prądotwórcze,
- z generatorami asynchronicznymi:
  - małe elektrownie wodne (po modernizacji),
- z falownikami (generatorami) energoelektronicznymi:
  - elektrownie słoneczne,
  - elektrownie wiatrowe,
  - mikroturbiny gazowe,
  - agregaty prądotwórcze [13, 17],
  - ogniwa paliwowe.

Do wspomnianych źródeł warto dodać bateryjne zasobniki energii, które są postrzegane, jako niezbędne elementy systemów o przewadze generacji rozproszonej [8]. Tutaj również urządzeniem wyprowadzającym moc jest falownik energoelektroniczny.

Zdolność wydania prądu zwarciorowego przez dany rodzaj elektrowni zależy głównie od dwóch czynników:

1. wytrzymałości zwarciorowej urządzenia generacyjnego,
2. zdolności źródła do wydania energii przy obciążeniu niskoomowym, niezbędnej do zasilenia zwarcia.

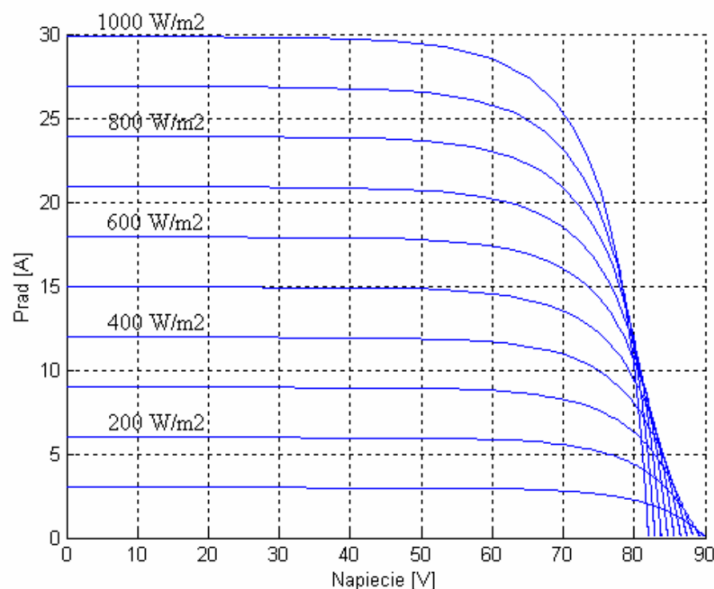
Pierwszy czynnik zależy od zdolności danego urządzenia do odprowadzenia lub zgromadzenia dodatkowego ciepła, które wydziela się w trakcie przepływu prądu zwarciorowego. Generatory maszynowe mają znacznie większą pojemność cieplną, niż urządzenia elektroniczne. Stąd pierwszy element, który decyduje o ich większej zdolności do wydawania prądów zwarciorowych. Falowniki energoelektroniczne praktycznie nie mają pojemności cieplnej i, żeby były zdolne do przewodzenia prądu zwarciorowego, muszą być do tego specjalnie skonstruowane.

Drugi czynnik wynika ze zdolności zgromadzenia i wydania energii przy pracy w przeciążeniu prądowym. Układy wytórcze z maszynami wirującymi mają stosunkowo duże energie zmagazynowane w masie wirującej i energie te mogą być uwolnione. Zachowanie generatorów maszynowych w zwarciu doskonale opisuje klasyczna pozycja [14].

Podobnie akumulatory mają dużą zdolność wydania energii w zwarciu, szczególnie ogniwa litowo-jonowe. Największy spodziewany prąd zwarciorowy takiego ogniwa o pojemności rzędu 50 Ah i napięciu nominalnym 3,6 V sięga 6 kA, co wynika z bardzo niskiej rezystancji wewnętrznej i stosunkowo dużego ładunku zgromadzonego w polu elektrycznym. Dla porównania, ogniwo kwasowo-ołowiowe o podobnej pojemności i napięciu nominalnym 2 V ma spodziewany prąd zwarcia rzędu 1000 A. Prądy te mają tak duże wartości i narastają tak szybko, że trudno jest projektować selektywne zabezpieczenia, zwłaszcza w układach zabezpieczeń wielopoziomowych.

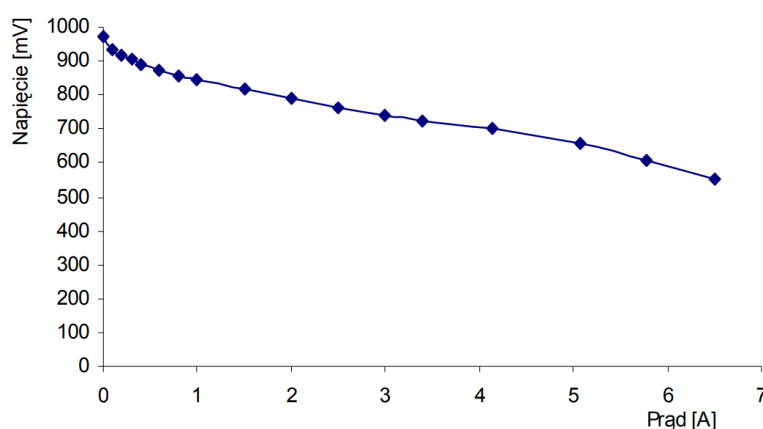
Odmienne zachowanie reprezentują baterie słoneczne i ogniwa paliwowe. Te pierwsze są de facto źródłami prądu. Generowany prąd jest zależny wyłącznie od nasłonecznienia (pozioma część charakterystyki z rys. 1), ponieważ liczba elektronów tworzących prąd jest proporcjonalna do liczby fotonów padających na powierzchnię aktywną baterii słonecznej (elektron jest „wypychany” z baterii słonecznej, gdy „uderzy” w niego foton). Ta cecha ujawnia się właśnie przy przeciążeniu. Prąd generowany w zwarciu (dla napięcia bliskiego zeru) jest ograniczony do wartości maksymalnej właściwej dla bieżącego nasłonecznienia oraz z właściwości danego panelu zgodnie z charakterystyką jak przedstawiona na rys. 1. Zwarta bateria będzie generować taki ograniczony prąd. Stąd prąd zwarciorowy fotowoltaicznej baterii słonecznej, a wobec braku innych źródeł energii również elektrowni słonecznej, ma wartość w granicach prądu maksymalnego

zapisanego w danych katalogowych. Wydanie prądu zwarciovego przez te elektrownie wymaga specjalnych zabiegów, polegających na zabudowie pojemności. Zagadnienie to zostanie omówione dalej.



Rys. 1. Charakterystyka prądowo-napięciowa baterii słonecznej [3]

Podobnie ogniwa paliwowe (rys. 2). Są to źródła elektrochemiczne, które nie mają ani zdolności wydania prądów zwarciovych, ani nawet niewielkiej przeciążalności, ponieważ łatwo ulegają uszkodzeniu. Są typowo wyposażane w odpowiednie szybkie zabezpieczenie nadprądowe i podnapięciowe, realizowane przez współpracujące przekształtniki energoelektroniczne. Podobnie, jak w wypadku elektrowni fotowoltaicznych wymagają zabudowy dodatkowych urządzeń, jeżeli mają brać udział w wyłączaniu zwarć.



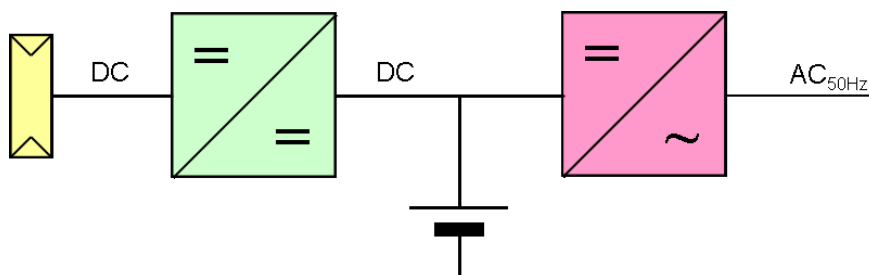
Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa paliwowego typu PEM [3]

Zatem, aby zapewnić możliwość generacji odpowiednio dużych prądów zwarciovych przez elektrownie słoneczne i z ogniwami paliwowymi należy je odpowiednio przystosować. Mają one zazwyczaj w strukturze dwa przekształtniki energoelektroniczne połączone kaskadowo (rys. 3). Pomiędzy nimi znajduje się obwód pośredniczący prądu stałego. Przetwornice pierwszego stopnia pełnią funkcję zabezpieczeń, regulacji mocy (np. śledzenia punktu mocy maksymalnej, MPPT), oraz utrzymania na zaciskach wejściowych falownika w miarę stałego napięcia niezbędnego dla generacji wyjściowej fali sinusoidalnej. Ponieważ element źródłowy nie może wygenerować prądu zwarciovego to przetwornica pierwszego stopnia nie musi takiego prądu przewodzić. Jeżeli w obwodzie pośredniczącym (o charakterze napięciowym) zostanie zabudowany element umożliwiający zasilanie odbioru niskoomowego, to cała elektrownia nabierze zdolności wydania prądu zwarciovego. Wymaga to również przystosowania falownika, co zostanie omówione dalej. W obwodzie prądu stałego można zwiększyć zdolność zwarciovą przez zabudowę elementów o charakterze pojemnościowym:

- dużych kondensatorów,

- superkondensatorów,
- akumulatorów.

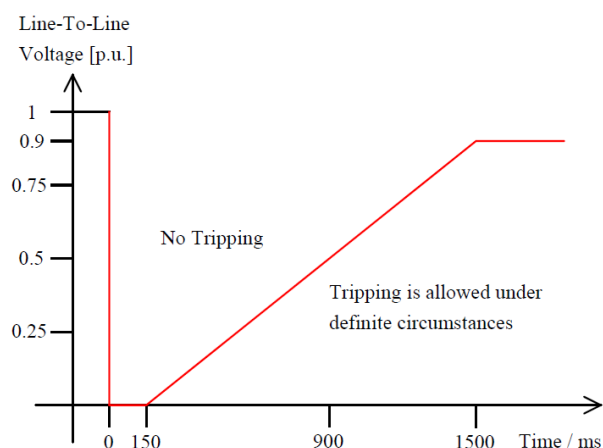
W praktyce, żeby zrealizować rozsądną charakterystykę zwarciovą wystarczy odpowiednio duży bank kondensatorów elektrolitycznych.



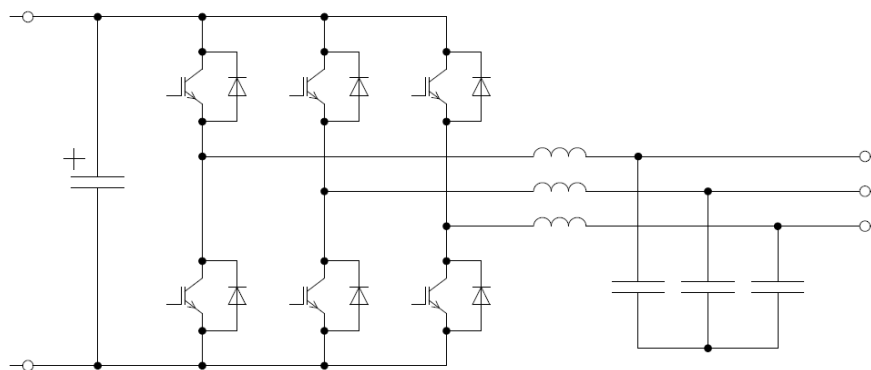
Rys. 3. Struktura elektrowni słonecznej z przetwornicą DC/DC do celów regulacji mocy (MPPT), elementem magazynującym i falownikiem wyjściowym [oprac. własne]

W początkowej fazie rozwoju źródeł odnawialnych i rozproszonych do grupy źródeł niebiorących udziału w zasilaniu zakłóceń zaliczano także elektrownie wiatrowe i inne wyposażone w przekształtniki energoelektroniczne, pomimo że przetworniki energii pierwotnej miały zdolność wydania energii przy zakłóceniu. Zagadnienie zdolności zwarcioviej różnych źródeł odnawialnych jest przystępnie przedstawione w pracy [25].

Przystosowanie źródła z generatorem energoelektronicznym do pracy w zwarciu podwyższa jego koszt, co jest jedną z głównych przyczyn braku możliwości pracy zwarcioviej małych elektrowni instalowanych u odbiorców końcowych i prosumentów. W wypadku elektrowni przyłączanych do sieci średniego napięcia czynnik ten jest mniej istotny. Obecnie, w wielu krajach zasobniki energii, elektrownie wiatrowe, słoneczne i inne, wyposażone w generatory energoelektroniczne, o mocach odpowiednio dużych oraz przyłączane do sieci SN, muszą brać udział w wyłączeniu zwarć. Żądanie to realizuje się poprzez obowiązkową realizację zadanej charakterystyki LVRT (ang. low voltage ride through). Najpopularniejsza krzywa LVRT, stosunkowo prosta do osiągnięcia, jest przedstawiona na rys. 4. Sposób badania źródeł jest opisany na przykład w normie dotyczącej siłowni wiatrowych IEC 61400-21. Charakterystyka LVRT powstała po to, żeby uniknąć nagłej utraty zdolności generacyjnych przez podsystemy oparte o źródła odnawialne i rozproszone.



Rys. 4. Przykładowa charakterystyka LVRT [26]

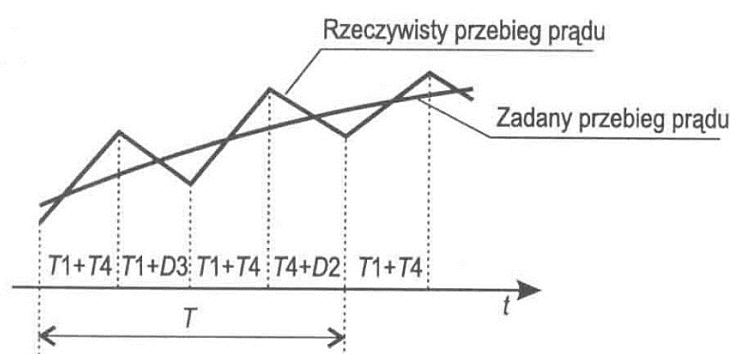


Rys. 5. Falownik zasilany ze źródła napięcia [oprac. własne]

### 3. Falownik energoelektroniczny i jego właściwości

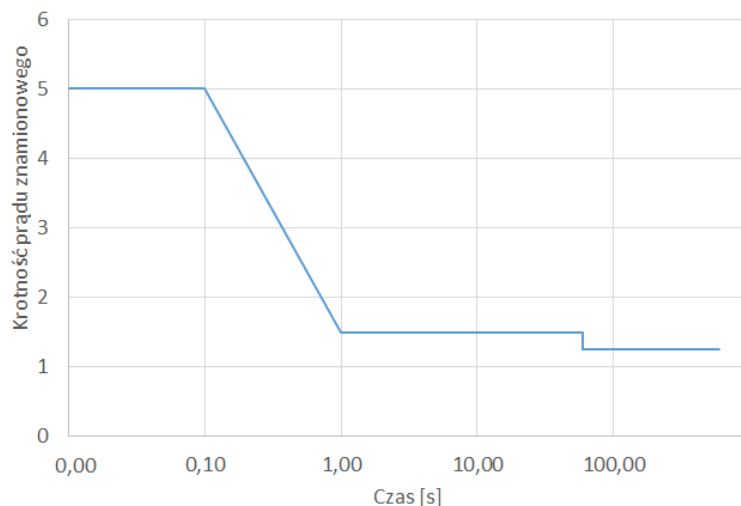
W małych elektrowniach stosuje się trójfazowe generatory energoelektroniczne w postaci falownika tranzystorowego, zasilanego ze źródła napięcia (VSI, ang. voltage source inverter). Budowa obwodu mocy takiego falownika jest przedstawiona na rys. 5 [2, 7, 10, 22].

Kształtowanie fali wyjściowej prądu sinusoidalnego polega na odpowiednim załączaniu i wyłączaniu tranzystorów techniką modulacji szerokości impulsów z założoną częstotliwością taktowania, przekraczającą we współczesnych konstrukcjach 5 kHz i sięgającą kilkudziesięciu kiloherców. Ideę tę przedstawia rys. 6 [7]. Tranzystory przez część okresu taktowania przewodzą prąd. W pozostałym czasie przewodzi odpowiednia dioda. Tranzystory mogą w bardzo krótkim czasie, poniżej 1  $\mu$ s, wyłączyć prąd płynący przez nie. Tak sterowany falownik stanowi praktycznie idealne źródło napięcia. Kształt, częstotliwość generowanej sinusoidy zależy w niewielkim stopniu od obciążenia. W praktyce niezbędne jest stosowanie regulatorów prądu nie tylko do regulacji generowanej mocy, ale przede wszystkim ograniczania prądu wyjściowego do wartości dopuszczalnych tak w stanach ustalonych, jak i przejściowych.



Rys. 6. Kształtowanie fali prądu przez falownik [7]

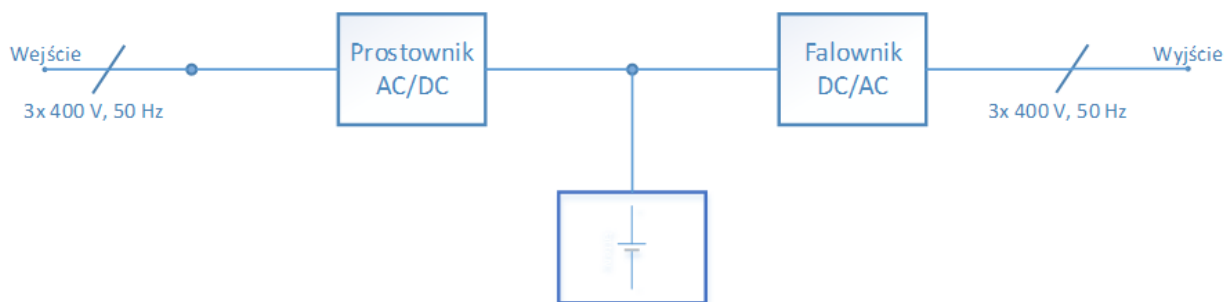
W wypadku wystąpienia zwarcia w obwodzie zasilanym przez idealny falownik (bez ograniczenia prądu) przebieg prądu będzie wyglądał podobnie, jak w wypadku zwarcia w SEE. Oprócz składowych okresowej o częstotliwości sieci i związanej z nią składowej nieokresowej, pojawią się dodatkowe składowe okresowe, o częstotliwości charakterystycznej filtra wyjściowego LC, i powiązana z nią składowa nieokresowa, która szybko zanika. Prąd wyjściowy falownika nie może jednak w praktyce osiągnąć wartości rzędu kiloamperów, ponieważ tranzystory nie mogą przewodzić takich prądów. Dlatego falowniki są wyposażone w szybkie układy zabezpieczeń nadprądowych, które wyłączają tranzystor przy przekroczeniu założonej wielkości prądu. Zabezpieczenia te działają na każdy tranzystor w każdym okresie taktowania tranzystora, w którym nastąpi przekroczenie. Dzięki temu falownik nie traci całkowicie zdolności do kształtowania fali prądu wyjściowego w zwarcu. Jest w stanie, przez określony czas zasilać zwarcie prądem przemiennym o częstotliwości sieciowej. Czas trwania przeciążenia jest, jak wspomniałem wyżej, wynika z działania układów regulacji i jest ograniczony parametrami tranzystorów. Producenci publikują charakterystyki przeciążalności falowników. Przykładowa jest przedstawiona na rys. 7.



Rys. 7. Charakterystyka przeciążalności prądowej falownika [oprac. własne]

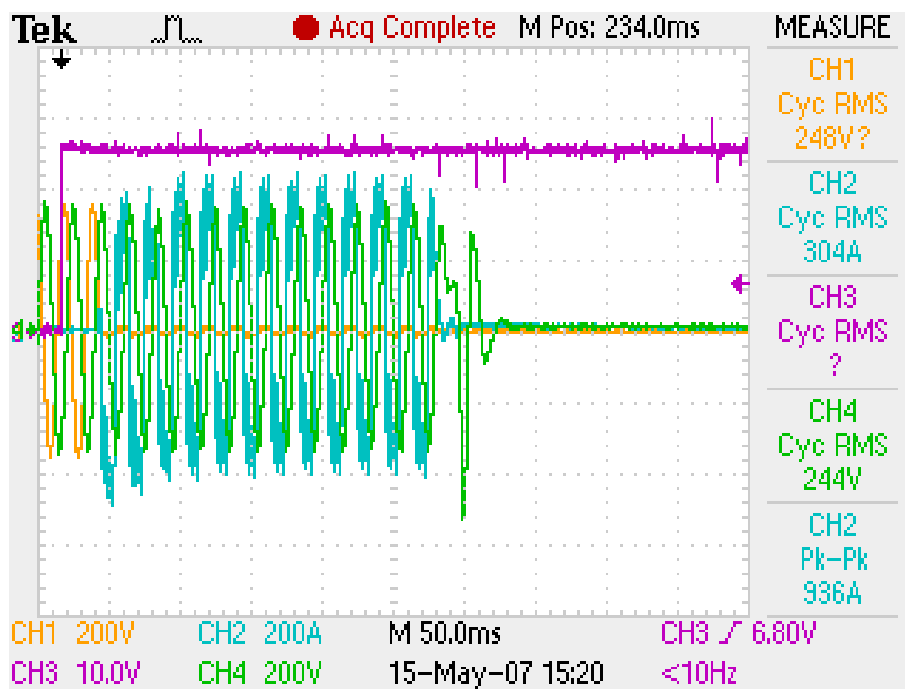
#### 4. Wylączenie zwarć w układach gwarantowanego zasilania

Falowniki fotowoltaiczne nie mają przeciążalności lub jest ona niewielka. Podobnie falowniki napędowe. W oby wypadkach nie ma bowiem możliwości i potrzeby pracy w zwarcu, a nawet jest to niepożądane. Natomiast już falowniki do UPS mają przeciążalności i to dość duże. Falowniki do pracy w sieciach, gdzie wymagany jest udział w zwarcia i zadana jest charakterystyka LVRT, muszą się również wykazywać znaczącą przeciążalnością. Wśród producentów można zaobserwować wyraźny podział na tych doświadczonych bardziej w napędach, których falowniki zazwyczaj mają mniejsze przeciążalności, i tych doświadczonych bardziej w systemach gwarantowanego zasilania, dla których duża przeciążalność jest normą.



Rys. 8. Schemat blokowy UPS true on-line [oprac. własne]

Dobrym przykładem, mogącym stanowić punkt wyjścia do dalszych prac, jest zatem zachowanie systemu gwarantowanego zasilania, wykorzystującego UPS o podwójnym przetwarzaniu. UPS tego typu ma strukturę przedstawioną na rys. 8. Źródłem energii jest jedynie falownik energoelektroniczny, zasilany z baterii. Prąd zwarcia jest ograniczony właściwościami falownika i zamyka się w obwodzie baterii. Zwarcia prąd wyjściowy jest generowany przez określony czas (rys. 9).



Rys. 9. Prąd falownika UPS w zwarcu L1-N: CH1 – napięcie L1, CH2 – prąd L1, CH3 – aktywacja zwarcia, CH4 – napięcie L2; prąd zwarcia generowany przez 12 okresów [oprac. Własne]

Jeżeli układ taki zasila sieć rozgałęzioną, to występuje problem selektywnego wyłączania zwartych gałęzi w założonym czasie, który nie spowoduje zakłócenia pracy innych odbiorów. Typowo przyjmuje się, że wyłączenie powinno nastąpić w czasie do 10 ms. Falownik musi być tak dobrany, aby był w stanie pobudzić odpowiednie zabezpieczenie w takim czasie. Sieci tego typu są wyposażone w wyłączniki z zabezpieczeniami, bezpieczniki i wyłączniki nadmiarowo-prądowe, wykonane zgodnie z normą EN 60898. Dla zapewnienia prawidłowej pracy zabezpieczeń stosuje się falowniki o znacznej krótkotrwałej przeciążalności prądowej, która może się gać nawet dziewięciokrotności prądu znamionowego. Przykładowo, prądy niezbędne dla aktywacji wybranych zabezpieczeń przedstawia tabela 1.

Zabezpieczenie	Prąd wyzwalaia dla $t_s = 10 \text{ ms}$ [A]	Wymagana krotność prądu falownika UPS 100 kVA
B16	80 – 112	1
C32	320 – 416	3
gG63	1000 – 1800	12
gG125	2500 – 4000	nie stosuje się

Tab. 1. Prądy wyzwalaiające zabezpieczenia różnych typów i wymagane krotności prądu falownika UPS 100 kVA

## 5. Udział generatorów elektronicznych w zakłóceniach

Doświadczenia z układów gwarantowanego zasilania pokazują, że jest możliwe wykonanie falownika o dużym potencjale zwarcia, ale jest on znacznie droższy. Wciąż jednak będzie miał mniejsze możliwości niż generator synchroniczny.

Obecnie w układach niskiego napięcia zakłada się, że elektrownie przyłączone do sieci nie biorą udziału w wyłączaniu zwań. Stosuje się specjalne zabezpieczenia, np. według normy DIN VDE 126-1-1, których zadaniem jest szybkie wyłączenie źródeł w wypadku zakłócenia. Przyczyną takiej sytuacji jest właśnie fakt, że w sieciach niskiego napięcia dominują proste elektrownie słoneczne, które nie mają dużych zdolności zasilania zwań.

W wypadku układów większych mocy (tyb B i C), przyłączanych do sieci nN i SN normą jest żądanie udziału w zwań [UE 2016]. Zadaje się wtedy wymagane krzywe LVRT. Wydaje się szczególnie korzystne, gdy w sieci pracuje wiele generatorów energoelektronicznych o zdolności generacji prądów zwarcia. Mogą one wtedy wspólnie wyłączać zwań. Ale przedmiotem badań pozostaje charakter rozpyłów prądów w sieci, zależnie od rodzaju źródeł.

W układach o dużym udziale generacji rozproszonej oprócz prądów zwarciovych rozważa się między innymi następujące sposoby wykrywania zwarć [Brahma 2011, Gururajapathy 2017, Taft 2017]:

- pomiar i analiza synchronicznych fazorów prądu i napięcia,
- wyznaczanie impedancji zwarciowej obwodu,
- wyznaczanie oczekiwanej odpowiedzi obwodu metodami symulacyjnymi,
- wykorzystanie metod sztucznej inteligencji.

Wszystkie te metody wymagają wielu urządzeń pomiarowych, zainstalowanych co najmniej w punktach przyłączeń jednostek generacyjnych i w punkcie przyłączenia do KSE oraz sprawnej telekomunikacji.

W literaturze postuluje się, że w niedługiej przyszłości pojawią się sieci SN prądu przemiennego i stałego, w których wszystkie generatory będą energoelektroniczne i przyłączone bezpośrednio do sieci (bez transformatorów). Dla tych sieci, również ograniczonych przygotowuje się specjalne strategie wyłączania zwarć, ponieważ nie będzie w najbliższej przyszłości możliwe skonstruowanie falowników z tranzystorami na napięcia powyżej 2 kV o dużej przeciążalności prądowej. Przykłady takich rozważań można znaleźć w pracy [23]. Planowana jest zabudowa falowników nieprzeciążalnych i zastosowanie zabezpieczeń podnapięciowych, impedancyjnych i innych, również obecnie nie znanych.

Oczywiście wymienione wyżej nowe sposoby zabezpieczania sieci przed zwarciami nie wyprą całkowicie zabezpieczeń nadprądowych, które mogą być instalowane w dowolnym miejscu, nie wymagają do prawidłowego działania ani połączeń telekomunikacyjnych, ani prowadzenia skomplikowanych obliczeń.

## 6. Podsumowanie i wnioski

W sprawie należy przeprowadzić jeszcze wiele badań, obliczeń i sprawdzeń. To zadanie dla uczonych, którzy pracują nad zasadami działania SEE. Uczni ci muszą jednak przejść od prób utrzymania obecnej doktryny do rzeczywistych prac rozwojowych i podjąć badania nad nowymi sposobami pracy systemu, w tym wyłączania zwarć. Prace te powinny zawierać część podstawową, dotyczącą nowych aspektów zjawisk zwarciovych w systemie o dominacji wytwarzania rozproszonego i znaczącym udziale składowej rezystancyjnej w impedancji połączeń. Należy wypracować nowe sposoby eliminacji uszkodzonych fragmentów oraz opisać warunki brzegowe i wymagania dla systemów rozproszonych, które pozwolą na bezpieczną pracę. Należy przy tym zakładać większościowy udział generatorów energoelektronicznych.

Zdolność wydania prądu zwarciowego przez generator energoelektroniczny zależy od zaplanowanej roli danej jednostki w systemie. Oczekiwania te powinny być dobrze sformułowane i opisane, żeby producenci mogli dostosować swoje urządzenia. Ciekawą obserwacją jest, że producenci wywodzący się z rynku urządzeń gwarantowanego zasilania produkują urządzenia o większych mocach zwarciovych, niż producenci wywodzący się techniki napędu elektrycznego. Technika gwarantowanego zasilania wymaga bowiem uwzględnienia zagadnienia nadprądowego wyłączania zabezpieczeń, a napędowa nie. Brak zdolności wielu obiektów wytwórczych do generacji prądu zwarciowego nie jest obecnie ograniczeniem technicznym. Wynika z oszczędności przy braku postawionych wymagań.

Osobiście uważam, że zmiana charakteru systemu elektroenergetycznego to kwestia czasu. Powoli, acz konsekwentnie, zmierza on, podobnie jak system telekomunikacyjny, od czegoś zwanego naturalnym monopolem, ustalonego, hierarchicznego, uporządkowanego, do czegoś wspólnego, nieco chaotycznego, zmiennego, ale lepiej wykorzystującego dostępne zasoby i potrzeby uczestników.

Przedstawione zagadnienie zdecydowanie wymaga głębokich prac badawczych. Niezbędne jest wynalezienie nowych, opartych na innych zasadach, zabezpieczeń zwarciovych. Następnie należy skonstruować odpowiednie zabezpieczenia i jest przetestować w warunkach laboratoryjnych i polowych. To się oczywiście dzieje, szczególnie w krajach, gdzie dominuje generacja rozproszona, a system elektroenergetyczny nie dysponuje wystarczającą mocą zwarciovą. Jednak powinno również być przedmiotem badań w naszym kraju, w kontekście klastrow, spółdzielni energetycznych, czy lokalnych obszarów bilansowania.

## Literatura

- [1] Ackermann T., Andersson G., Söder L.: Distributed generation: a definition. Electric Power Systems Research, vol. 57, issue 3, 2001, pp. 195-204. On-line: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779601001018>
- [2] Barlik R., Nowak M.: Poradnik Inżyniera Energoelektronika. Wydawnictwo WNT i Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016.
- [3] Biczek P.: Optymalne wykorzystanie pierwotnych nośników energii na przykładzie hybrydowej elektrowni słonecznej z ogniwami paliwowymi. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny. Warszawa, 17.12.2003. On-line: <http://www.ee.pw.edu.pl/~biczel/teksty/doktorat.pdf>



- [4] Brahma S. M.: Fault Location in Power Distribution System With Penetration of Distributed Generation, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 3, pp. 1545-1553, July 2011.
- [5] Derski B., Zasuń R.: Rząd składa pocalunek śmierci energetyce. Portal wysokienapiecie.pl, 29.04.2019. Dostęp on-line w dn. 7.03.2020:  
<https://wysokienapiecie.pl/19099-ustawa-pradowa-cenach-energii-pocalunek-smierci/>
- [6] Derski B.: Wydobycie węgla w Polsce bliżej końca niż mówią politycy. Portal wysokienapiecie.pl, 9.03.2020. Dostęp on-line w dn. 11.03.2020:  
<https://wysokienapiecie.pl/27254-wydobycie-wegla-w-polsce-blizej-konca-niz-mowia-politycy/>
- [7] Dmowski A.: Ergoelektroniczne układy zasilania prądem stałym w telekomunikacji i energetyce. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998. ISBN 8320422248.
- [8] Handbook 2015. DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, Wyd. Sandia National Laboratories, 2015. On-line:  
<https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2015/151002.pdf>
- [9] Dulău L. I., Abrudean M., Bică D.: Effects of Distributed Generation on Electric Power Systems. Procedia Technology, vol. 12, 2014, pp. 681-686. On-line:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313007342>
- [10] Erickson R. W., Maksimovic D.: Fundamentals of Power Electronics. Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-3-030-43879-1.
- [11] Friedman N. R.: Distributed Energy Resources Interconnection Systems: Technology Review and Research Needs. National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-560-32459.
- [12] Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H. A.: Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 74, 2017, Pages 949-958. On-line:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117303386>
- [13] Iwański G., Koczara W.: Adjustable speed power generation systems with diesel genset. Combustion Engines / Silniki Spalinowe. 2009. Vol. 2009–SC1, p. 143–146.
- [14] Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych. Wydawca: Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2020. ISBN: 9788301193058
- [15] Khun T.: Struktura rewolucji naukowych. Aletheia, Warszawa, 2011.
- [16] Kocot H.: Energetyka rozproszona w scenariuszach rozwojowych polskiej elektroenergetyki do 2020 roku. Acta Energetica, nr 1, 2010, str. 49—59.
- [17] Koczara W.: Adjustable Speed Generator Systems – an Emerging Technology for Efficient Electrical Energy Generation. The 8th International Conference on Power Electronic. October 22-26, 2007, EXCO, Daegu, Korea.
- [18] Nuutinen P., Salonen P., Peltoniemi P., Silventoinen P. and Partanen J.: LVDC customer-end inverter operation in short circuit. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, 2009, pp. 1-10. URL:  
<http://ieeexplore-1iee-1org-10000bemt08b6.eczyt.bg.pw.edu.pl/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5279260&isnumber=5278662>
- [19] Popczyk J.: Energetyka postprzemysłowa – piąta fala innowacyjności. Wykład inauguracyjny rok akademicki 2009/2010 w Politechnice Śląskiej. (wewnętrzne wydawnictwo Politechniki Śląskiej).
- [20] Popczyk J.: Od działań kryzysowych 2020 do elektroprosumentyzmu 2050. Transformacja energetyki w trybie przelomowym. Część I. Rozległe uwarunkowania i punkt oddolnego praktycznego startu. www.cire.pl, 30.04.2020. URL: <https://www.cire.pl/item,197335,2,0,0,1,0,0,od-dzialan-kryzysowych-2020-do-elektroprosumentyzmu-2050-transformacja-energetyki-w-trybie-przelomowym-czesc-i-rozlegle-uwarunkowania-i-punkt-oddolnego-praktycznego-startu.html>
- [21] Singh Sn., Østergaard J., Jain N.: Distributed Generation in Power Systems: An Overview and Key Issues. 24th Indian Engineering Congress, NIT Surathkal, Kerala, December 10-13, 2009. On-line:  
[https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/5202512/24IEC\\_paper.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/5202512/24IEC_paper.pdf)
- [22] Skvarenina T. L.: The Power Electronics Handbook. CRC Press LLC, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2002.
- [23] Stieneker M., Mortimer B. J., Hinz A., Müller-Hellmann A., De Doncker R. W.: MVDC Distribution Grids for Electric Vehicle Fast-Charging Infrastructure. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), Niigata, 2018, pp. 598-606.
- [24] Taft J. D.: Fault Intelligence: Distribution Grid Fault Detection and Classification. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99352, 2017. On-line:

[https://gridarchitecture.pnnl.gov/media/white-papers/FaultIntelligence\\_PNNL.pdf](https://gridarchitecture.pnnl.gov/media/white-papers/FaultIntelligence_PNNL.pdf)

- [25] Tleis N.: Power Systems Modelling and Fault Analysis - Theory and Practice (2nd Edition). Elsevier 2019. Dostępne on-line:  
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPSMFAT03/power-systems-modelling/power-systems-modelling>
- [26] TransmissionCode 2007. Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Verband der Netzbetreiber - VDN – e.V. beim VDEW, August 2007. On-line:  
[https://www.n-ergie-netz.de/public/remotemedien/media/mdn/produkte\\_und\\_dienstleistungen/netzanschluss/gesetze/070801TransmissionCode\\_20072.pdf](https://www.n-ergie-netz.de/public/remotemedien/media/mdn/produkte_und_dienstleistungen/netzanschluss/gesetze/070801TransmissionCode_20072.pdf)
- [27] UE (2016). Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci.