

Ryszard Strzelecki

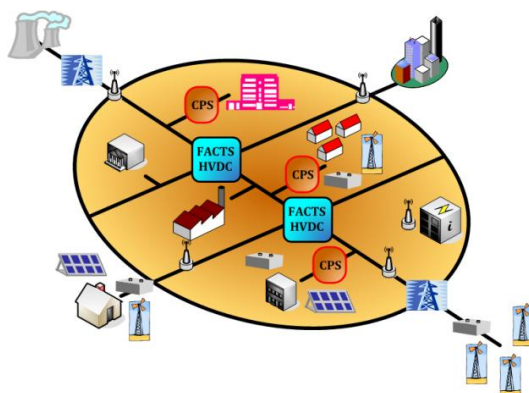
Akademia Morska w Gdyni

TECHNOLOGIE ENERGOELEKTRONICZNE W NOWOCZESNYCH SYSTEMACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

W artykule omówiono najważniejsze obszary zastosowań energoelektroniki w systemach elektroenergetycznych, w szczególności w systemach dystrybucyjnych. Przytoczone przykłady unaocniają zarazem celowość i niezbędność oraz wskazują kierunki dalszych prac badawczo-aplikacyjnych w tych obszarach, w tym prac koniecznych do przeprowadzenia w Polsce. Możliwość wykorzystania w tym celu potencjału krajowych ośrodków badawczo-rozwojowych ilustrują przedstawione rozwiązania praktyczne układów energoelektronicznych, dedykowanych bądź z możliwością adaptacji do systemów dystrybucyjnych.

1. WSTĘP

Podczas gdy zużycie energii elektrycznej (EE) zgodnie z prognozami będzie wzrastać (prawdopodobnie jednak wolniej niż przewidywano to 2–3 lata temu), tempo inwestycji w systemy elektroenergetyczne (SEE) w najlepszym wypadku pozostanie stałe. Ciągłe są preferowane rozwiązania tradycyjne w postaci nowych elektrowni i linii zasilających oraz towarzyszących im urządzeń, mimo iż proces ich lokalizacji i budowy jest trudny, kosztowny i czasochłonny. Konieczne inwestycje są zazwyczaj prowadzone na zasadzie kompromisu pomiędzy kosztami a wymaganą niezawodnością dostawy energii elektrycznej, któremu sprzyja zamiana struktury linii zasilających z promieniowej na sieciową. Niestety, taka zamiana prowadzi również do obniżenia możliwości sterowania przepływem mocy. Jest to szczególnie ryzykowne w sytuacji utraty jednej linii, powodującej przeciążenie innej linii i zwiększającej prawdopodobieństwo blackoutu. Ponadto, gwałtowny wzrost obciążenia prowadzi do „tłoku” na liniach kluczowych i w konsekwencji do nieefektywnego funkcjonowania rynku energii. Rozwiązaniem wydaje się przekształcenie obecnych SEE w tzw. inteligentne sieci elektroenergetyczne (ISEE) – koncepcję jednej z nich przedstawiono na rysunku 1. Przemawia za tym zarówno ich pełna sterowalność, jak i elastyczność oraz niezawodność. Ponadto ISEE umożliwiają stworzenie samokontrolującej się platformy do współpracy dużej ilości źródeł rozproszonych i elektrowni centralnych [45, 49].



Rys. 1. Koncepcja „inteligentnej” sieci elektroenergetycznej (ISEE)

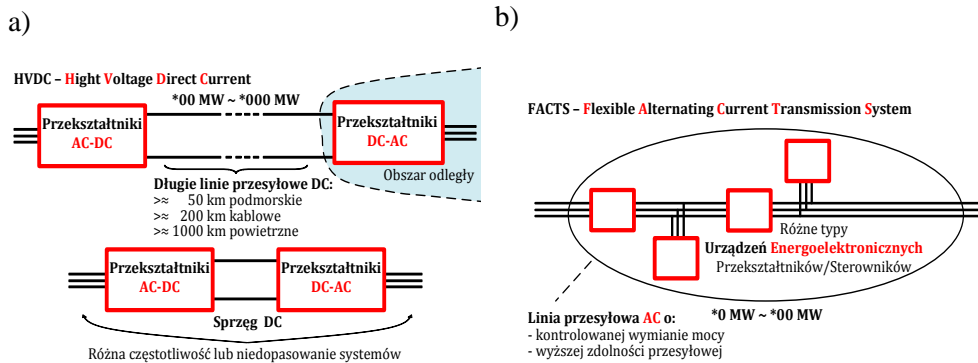
Jednym z podstawowych warunków przekształcenia tradycyjnych SEE w ISEE jest upowszechnienie w elektroenergetyce nowoczesnych układów energoelektronicznych (UE), w tym układów typu FACTS (*Flexible AC Transmission System*) oraz HVDC (*High Voltage DC*) [44, 54, 55] bądź M (*Medium*) VDC lub L (*Low*) VDC, a także bardzo licznej rodziny układów typu CPS (*Custom Power System*) [21]. Szersze wykorzystanie UE wskazane jest również w modernizowanych tradycyjnych SEE. Dotychczasowa aparatura łącznikowo-sprzęgająca to w większości urządzenia mechaniczne. Ich szybkość działania jest zadowalająca do sterowania SEE w stanie ustalonym, lecz nie wystarcza w sytuacjach wymagających reagowania na nieprzewidziane zmiany napięcia i warunków przepływu. Ta negatywna cecha urządzeń mechanicznych szczególnie uwidacznia się w konfrontacji z coraz większymi wymaganiami w zakresie jakości energii elektrycznej [50, 59, 63]. Szersze zastosowanie UE w SEE już dzisiaj pozwoliłoby na pełniejsze wykorzystanie istniejących zasobów dystrybucyjnych i przesyłowych, przy zachowaniu dotychczasowego stanu, a nawet poprawie bezpieczeństwa zasilania.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie miejsca oraz możliwości zastosowania nowoczesnych układów energoelektronicznych w SEE, ze szczególnym uwzględnieniem systemów dystrybucyjnych z dużym udziałem źródeł rozproszonych, w szczególności źródeł odnawialnych. Dodatkowo autor zaprezentował wybrane rozwiązania praktyczne opracowane z jego udziałem, ilustrujące częściowo możliwości krajowego potencjału naukowo-technicznego.

2. MIEJSCE ENERGOELEKTRONIKI W ELEKTROENERGETYCE

Obszar zastosowań UE w SEE można ogólnie podzielić na: 1) systemy przesyłu energii elektrycznej, 2) systemy dystrybucji (dostawy i odbioru) energii elektrycznej.

W systemach przesyłowych, zasadniczo, wyróżnia się tylko dwie komplementarne technologie sterowania przesyłem energii [55]: a) z przetwarzaniem na prąd stały – układy HVDC, b) bezpośrednio – układy FACTS. Ogólne porównanie tych technologii ilustruje rysunek 2.



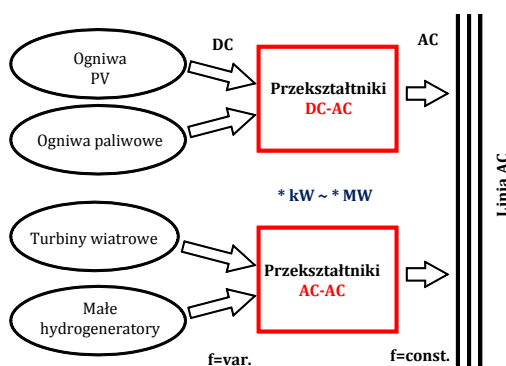
Rys. 2. Energoelektronika w systemach przesyłu: a) prądem stałym, b) prądem przemiennym

Zaletą układów typu HVDC jest możliwość przesyłu energii między systemami o różnych częstotliwościach. Jednakże w przypadku konwencjonalnych rozwiązań HVDC, tj. z zastosowaniem tyrystorów SCR, konieczne są duże układy filtracyjne i nie ma możliwości zasilania odbiorców po tej stronie, po której odłączono źródło systemowe. Te wady nie występują przy wykorzystaniu nowoczesnych energoelektronicznych łączników wyłączalnych dużej mocy, takich jak tyrystory GTO lub tranzystory IGBT [41]. Należy przy tym zauważyć, że w układach HVDC cała EE z jednego systemu do drugiego zawsze przepływa przez przekształtnik. Stąd też ich wysokie koszty, nawet w instalacjach jednostacyjnych (np. sprzęgi prądu stałego). Natomiast w układach typu FACTS, takich jak:

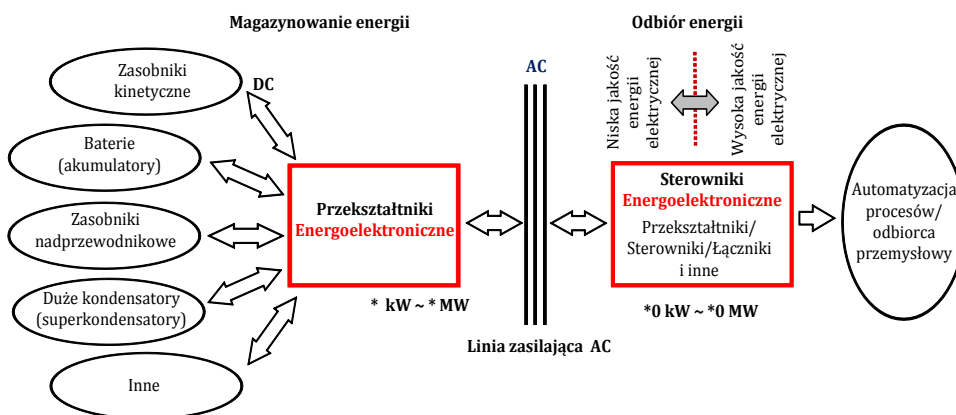
- kompensatory równoległe SVC (*Static Var Compensator*) oraz STATCOM (*Static Synchronous Compensator*),
- kompensatory szeregowo TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*), TSSC (*Thyristor Switched Series Compensator*) oraz SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*),
- przesuwniki fazowe SPS (*Static Phase Shifter*),
- zunifikowane sterowniki przepływu mocy UPFC (*Unified Power Flow Controller*),
- tylko część mocy przepływa przez przekształtniki. Układy te nadają się jednak wyłącznie do sterowania przepływem EE w systemach AC o jednakowej częstotliwości.

Znacznie większa różnorodność UE i technologii ich sterowania występuje w systemach dystrybucji. W tych systemach przekształtniki/sterowniki energoelektroniczne są stosowane ogólnie do:

- dopasowania parametrów i sprzężenia rozproszonych źródeł alternatywnych/odnawialnych z linią zasilającą lub lokalnym odbiorcą oraz sterowania poborem EE z tych źródeł (rys. 3),
- dopasowania parametrów i sprzężenia zasobników energii z linią zasilającą oraz sterowania wymianą energii pomiędzy zasobnikami a linią (rys. 4),
- poprawy jakości zasilania i odbioru EE, w tym między innymi: dopasowania poziomów oraz kompensacji zapadów i chwilowych wzrostów, a także niesymetrii i odkształceń napięcia zasilającego oraz kompensacji odkształceń, niesymetrii i przesunięć fazowych prądu odbiornika (rys. 4).



Rys. 3. Energoelektronika w systemach generacji alternatywnej

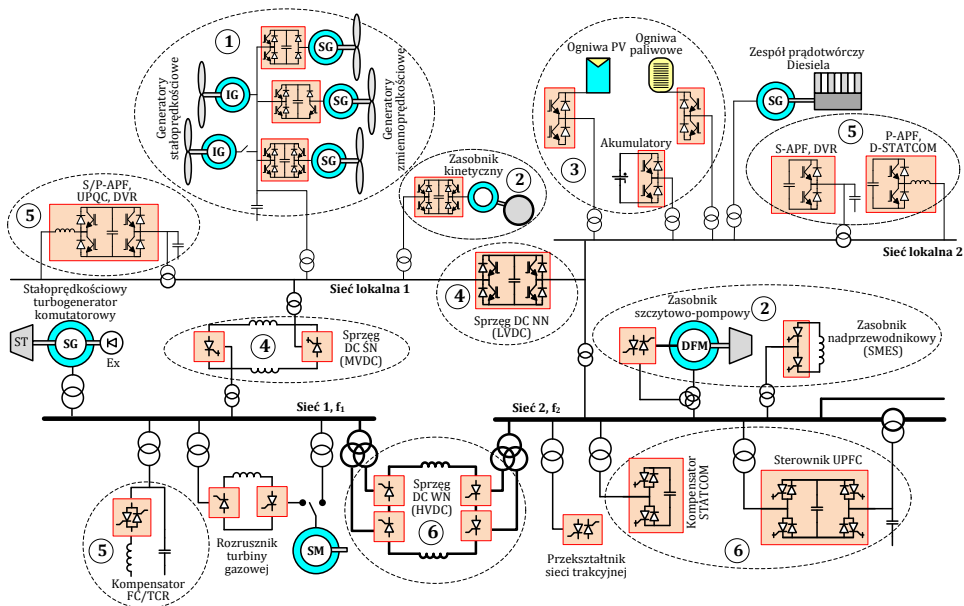


Rys. 4. Energoelektronika w systemach magazynowania i odbioru energii elektrycznej

3. PRZYKŁADY ZASTOSWAŃ UE W ELEKTROENERGETYCE

Rysunek 5 ilustruje najważniejsze obszary zastosowań UE w SEE, na różnych poziomach mocy. Dalsze omówienie tych obszarów, ze względu na przedmiot tego artykułu i cechy wspólne wykorzystywanych rozwiązań, ograniczono do:

- instalacji wiatrowych,
- zasobników energii i źródeł (ogniwi) niskonapięciowych,
- sprzęgów sieciowych i układów poprawy jakości energii.

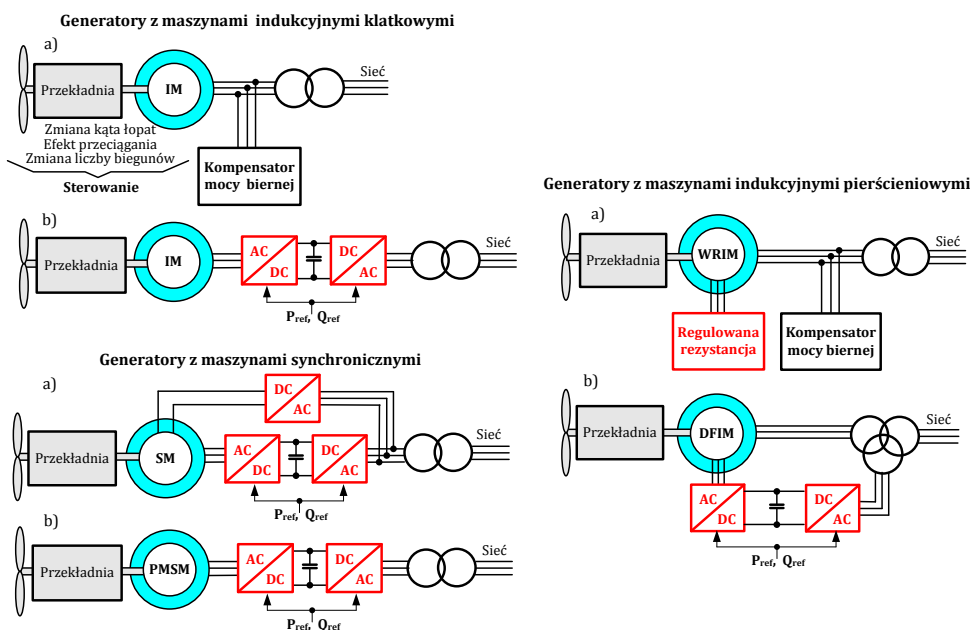


Rys. 5. Obszary zastosowań UE w SEE: 1 – instalacje wiatrowe, 2 – zasobniki energii, 3 – systemy zasilania ze źródeł niskonapięciowych, 4 – sprzęgi sieciowe, 5 – układy poprawy jakości, 6 – układy sterowania przesyłem

3.1. Instalacje wiatrowe

W instalacjach wiatrowych UE najczęściej umieszcza się w generatorach turbin (rys. 6) [6, 43]. Początkowo stosowano w nich głównie maszyny indukcyjne klatkowe (IM) dołączane bezpośrednio do SEE, a energoelektronikę wykorzystywano tylko w układach łączeniowo-rozruchowych. Dlatego też w takich turbinach występuje przenoszenie pulsacji mocy wiatru do sieci, a ponadto nie ma możliwości aktywnego sterowania mocą czynną i bierną. Znaczenie takiego sterowania, pożądanego dla kontroli napięcia i częstotliwości w SEE, rośnie przy

tym wraz ze wzrostem mocy [6, 26]. Z tych przyczyn generatory z maszynami indukcyjnymi klatkowymi dołączanymi bezpośrednio do SEE stosuje się sporadycznie w nowych instalacjach dużej mocy. Rzadko też, ze względu na straty mocy i ograniczone możliwości regulacyjne, są instalowane generatory z maszyną indukcyjną pierścieniową (WRIM) i rezystancją regulowaną energoelektronicznie w obwodzie wirnika [53].



Rys. 6. Podstawowe rodzaje generatorów turbin wiatrowych

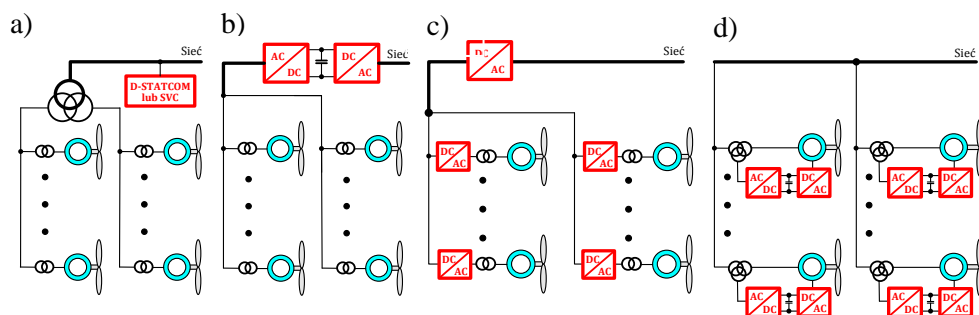
Obecnie na świecie w 70–80% wykorzystuje się generatory turbin wiatrowych:

- z maszyną indukcyjną pierścieniową podwójnie zasilaną (DFIM) i przekształtnikiem AC-DC/DC-AC w obwodzie wirnika (wymiarowanym tylko na moc poślizgu),
- z maszyną synchroniczną (SM) i przekształtnikiem AC-DC/DC-AC w torze głównym oraz przekształtnikiem AC-DC w obwodzie wzbudzenia,
- z maszyną synchroniczną o magnesach stałych (PMSM) i przekształtnikiem AC-DC/DC-AC w torze głównym.

W ostatnich latach ponownie pojawiają się generatory z maszynami indukcyjnymi klatkowymi (IM) o wzbudzeniu własnym i przekształtnikiem AC-DC/DC-AC w torze głównym (wymiarowanym na pełną moc) [8, 19, 53]. Wszystkie te rozwiązania, choć droższe od stosowanych na początku rozwoju energetyki wiatrowej, cechują się dużo lepszymi właściwościami regulacyjnymi, w tym: możliwością regulacji mocy czynnej i biernej, możliwością pracy przy zmiennej prędkości obrotowej wału, szybką reakcją na zmiany warunków wiatrowych

(0,5÷1 ms), pomijalnym wpływem i odpornością na pogorszenie jakości EE w SEE, a także możliwością pracy wyspowej [26, 43]. Te cechy wspiera implementacja wektorowych metod sterowania, opracowanych pierwotnie dla napędu [9, 38, 51], oraz algorytmów MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) umożliwiających pełne wykorzystanie dostępnej energii wiatru [8]. Wielobiegunowe SM i PMSM pozwalają przy tym wyeliminować przekładnię mechaniczną – podnosi to sprawność turbiny.

Przekształtniki energoelektroniczne dużej mocy są również częścią farm wiatrowych, obejmujących minimum kilka ustawionych blisko siebie i połączonych turbin. Konfiguracja farmy zależy przy tym zarówno od rodzaju generatora turbiny, jak i od typu stosowanych przekształtników oraz topologii SEE [6, 26, 43]. Przykładem są typowe połączenia turbin z generatorami indukcyjnymi pokazane na rysunku 7.



Rys. 7. Typowe połączenia turbin z maszynami indukcyjnymi stosowane na farmach wiatrowych: a) z kompensatorem mocy bierniej (D-STATCOM lub SVC), b) ze wspólnym sprzęgiem DC z siecią zasilającą, c) z wewnętrzną siecią DC i indywidualnym sterowaniem mocą, d) z indywidualnym sterowaniem mocą

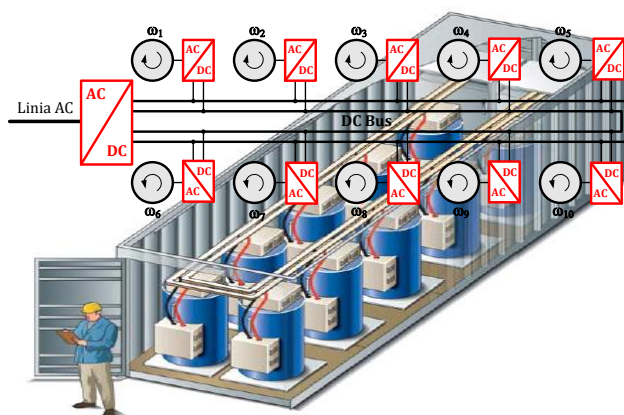
W farmie jak na rysunku 7a, grupującej turbiny z generatorami klatkowymi, układ D-STATCOM (lub SVC) dostarcza moc bierną do maszyn i pomaga w utrzymaniu profilu napięcia w sieci. Niestety, ta farma nie daje możliwości indywidualnego sterowania mocą turbin i kontroli cyrkulacji mocy pomiędzy turbinami. Nie jest również możliwa eliminacja zjawiska przenoszenia pulsacji mocy wiatru do sieci. Tej ostatniej wady pozbawiona jest farma przedstawiona na rysunku 7b, ponieważ sprzęg DC (przekształtnik AC-DC/DC-AC) pozwala nie tylko kontrolować moc bierną oraz profil napięcia sieci, ale również aktywnie sterować mocą czynną, dostarczaną do sieci. Ten sprzęg stwarza także interesującą opcję podłączenia farmy umiejscowionej daleko do istniejącego SEE linią DC.

Rozwinięciem koncepcji zastosowania sprzęgów DC w farmach wiatrowych jest konfiguracja przedstawiona na rysunku 7c. Część prostownikowa przekształtnika AC-DC/DC-AC dużej mocy (rys. 7b) została rozdzielona na poszczególne turbiny, tworząc w ten sposób wewnętrzną sieć DC i umożliwiając indywidualne sterowanie mocą turbin. Należy przy tym zaznaczyć, że dopasowanie turbiny do sieci DC jest znacznie prostsze niż do sieci AC, ponieważ sieć DC wymaga tylko

jednego parametru kontrolowanego (amplitudy), a sieć AC aż trzech (amplitudy, częstotliwości i fazy). Ponadto wydzielenie sieci DC upraszcza dołączenie zasobników energii. Dlatego przekształtniki AC-DC/DC-AC w poszczególnych turbinach występują na farmie zazwyczaj tylko wtedy, gdy już wcześniej są zintegrowane z turbiną. Najczęściej też dotyczy to turbin, w których stosuje się generatory z maszynami DFIM (rys. 7d) lub PMSM. Przekształtniki AC-DC/DC-AC dla poszczególnych turbin znajdują również swoje uzasadnienie w przypadkach bardzo dużych mocy.

3.2. Zasobniki energii i systemy ze źródłami niskonapięciowymi

Zasobniki energii, w postaci akumulatorów, powszechnie są stosowane w układach zasilania awaryjnego. W takich układach większej mocy wykorzystuje się również koła zamachowe [37], gromadzące energię kinetyczną. Przykład zasobnika kinetycznego, wykonanego w postaci kontenera przedstawia rysunek 8. Nieduże zasobniki wysokoobrotowe są dołączone do wewnętrznej linii DC przez przekształtniki AC-DC, a dopiero potem przez przekształtnik DC-AC do linii AC. To rozwiązanie, ze względu na mniejszy moment bezwładności pojedynczego zasobnika, cechuje wysoka dynamika i prosta możliwość jej dalszego podwyższenia. W tym celu stosuje się dodatkowy zasobnik akumulatorowy lub/i kondensatorowy w linii DC. Należy przy tym zaznaczyć, że największe trudności w wykonaniu nowoczesnego zasobnika kinetycznego wiążą się nie z energoelektroniką, a z technologią wysokoobrotowego koła zamachowego (60 000÷90 000 obrotów/min).

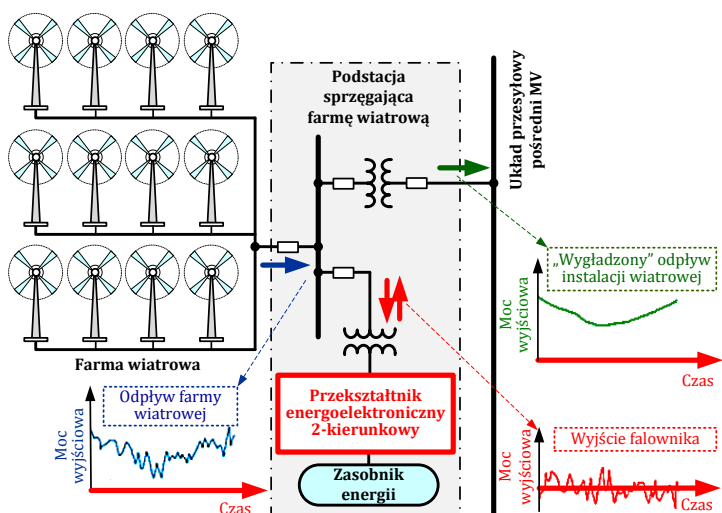


Rys. 8. Przykład kontenerowego zasobnika kinetycznego

Akumulatory, koła zamachowe i inne zasobniki, takie jak: zbiorniki wodne, systemy wodorowe, magazyny energii cieplnej, superkondensatory, magazyny nadprzewodzące czy zbiorniki sprężonego powietrza są także używane w układach

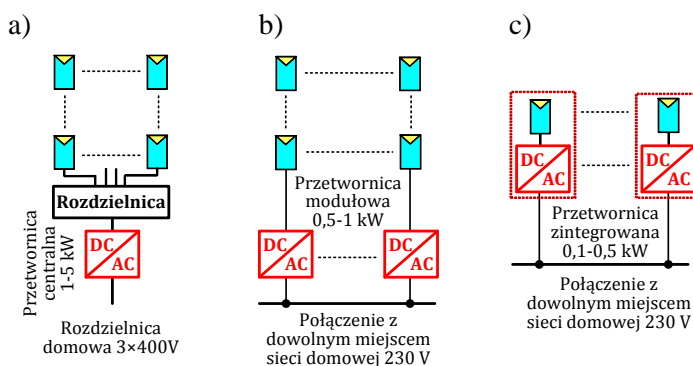
generacji rozproszonej ze źródłami odnawialnymi [22, 49]. Celem jest poprawa dyspozycyjności tych źródeł, tj. złagodzenie, lub nawet wyeliminowanie, wpływu warunków zewnętrznych (pogodowych) na moc chwilową dostarczaną do SEE. Do sprężania tych zasobników z siecią służą różne UE.

Na rysunku 9 przedstawiono przykład wykorzystania zasobnika energii do kompensacji pulsacji mocy czynnej wywołanych wahaniami energii wiatru. Stopień kompensacji zależy od pojemności i właściwości dynamicznych zasobnika oraz zastosowanego algorytmu sterowania [56]. To z kolei wpływa na moc przekształtnika, którego typ wybiera się z uwzględnieniem dwukierunkowego przepływu energii i rodzaju zasobnika. Na przykład dla akumulatorów będzie to przekształtnik AC-DC, a dla koła zamachowego z silnikiem AC przekształtnik AC-AC. Moc przekształtnika zależy także od jego funkcji dodatkowych, np. zdolności kompensacji mocy biernej.



Rys. 9. Zastosowanie zasobnika energii do kompensacji pulsacji mocy czynnej na odpływie farmy wiatrowej

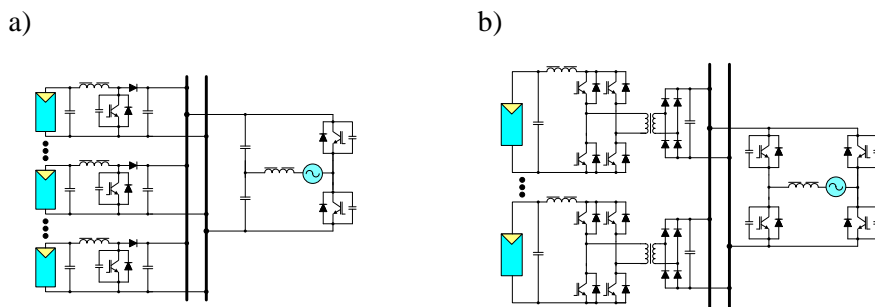
W przypadku wykorzystywania zasobników oraz źródeł niskonapięciowych dodatkowy i bardzo istotny wpływ na właściwości przyjętego rozwiązania ma konfiguracja źródeł i sposób dopasowania poziomów ich napięć. Właściwości rozwiązania zależą przy tym, w sposób oczywisty, od UE stosowanych jako odpowiednie interfejsy [7]. Jako typowe przykłady można tutaj wskazać systemy zasilania z ogniw fotowoltaicznych (PV) i ogniw paliwowych (FC) [12, 16], mimo że te ogniwa, w odróżnieniu od zasobników, nie cechują się możliwością dwukierunkowego przepływu energii.



Rys. 10. Typowe konfiguracje systemów zasilania z ogniwami PV: a) konwencjonalna, b) modułowa, c) zintegrowana

Dla systemów PV wyróżnia się trzy podstawowe konfiguracje połączeń przedstawione na rysunku 10. Najbardziej uniwersalną, a zarazem o najwyższych wymaganiach względem UE, jest konfiguracja z niedużą przetwornicą DC-AC zintegrowaną z modułem PV. Przetwornica powinna się charakteryzować: bardzo wysoką sprawnością i małymi gabarytami, wielokrotnym podwyższeniem napięcia ogniwa oraz sinusoidalnym napięciem wyjściowym, a także możliwością pracy w połączeniach równoległych. Te wymagania udaje się połączyć w różnych UE o modulacji impulsowej, np. [7, 10, 12, 28, 39, 42, 61], realizowanych za pomocą współczesnych podzespołów energoelektronicznych [15, 32, 37, 41].

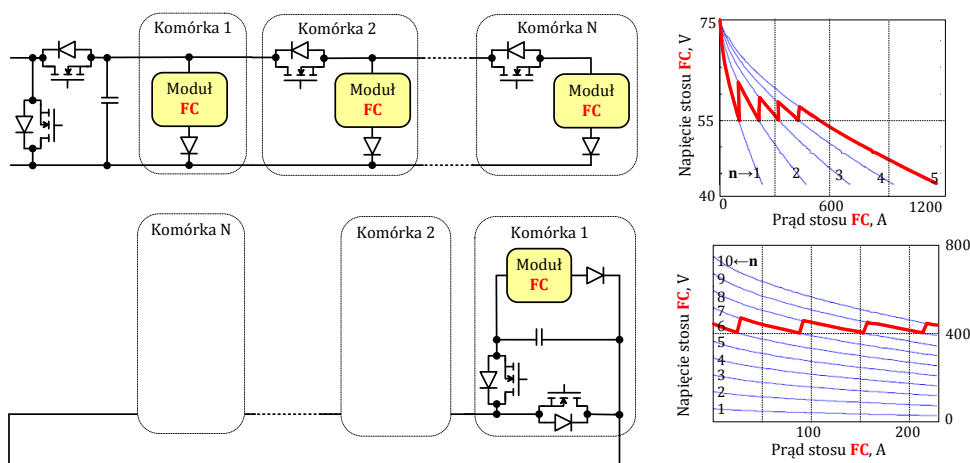
W systemach PV konfigurowanych konwencjonalnie, na ogół o większej mocy, często stosuje się wewnętrzną szynę DC (rys. 11). Jej cel jest podobny jak w przypadku farmy wiatrowej przedstawionej na rysunku 7c. Szyna DC pozwala też łatwiej izolować galwanicznie ogniwa PV za pomocą transformatorów w.c.z. (rys. 12b), ponadto może być integralną częścią wewnętrznej mikrosieci prądu stałego [30, 31, 35, 40].



Rys. 11. Przykładowe połączenia ogniw PV z siecią dystrybucyjną

W podobny sposób jak systemy PV, z wykorzystaniem bliźniaczych UE i szyny DC, są również konfigurowane systemy z ogniwami FC [16, 36]. W tym

wypadku, ze względu na miękką charakterystykę wyjściową i niskie napięcie pojedynczego ogniwa, istotne znaczenie ma łączenie ogniw FC w stosy o wymaganym napięciu wyjściowym i zdolności obciążeniowej. Przykładowe zastosowanie połączeń ogniw FC w stosy szeregowe i równoległe oraz charakterystyki prądowo-napięciowe tych stosów pokazano na rysunku 12.

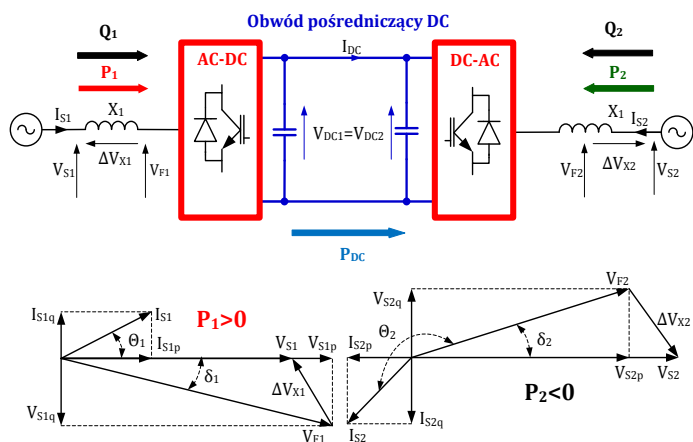


Rys. 12. Połączenia równoległe i szeregowe modułów FC w stosy i ich charakterystyki

3.3. Sprzęgi sieciowe i układy poprawy jakości energii

Energoelektroniczne sprzęgi sieciowe oraz układy poprawy jakości energii mają bardzo wiele cech wspólnych z układami sterowania przesyłem energii. Zasadnicza różnica wynika z funkcji i miejsca tych układów w SEE [21].

Najbardziej uniwersalnymi sprzęgami są układy typu „back-to-back” składające się z dwóch w pełni sterowalnych przekształtników AC-DC i DC-AC (napięcia lub prądu), połączonych obwodem DC [11, 46, 51, 58]. Gdy jeden przekształtnik pracuje jako falownik, to drugi jako prostownik. Zamiana trybów pracy przekształtników powoduje zmianę kierunku przepływu mocy. Przez obwód pośredniczący DC przepływa przy tym zawsze tylko moc czynna – z tego powodu układ staje się niewrażliwy na różnice częstotliwości i fazy w sprzęganych sieciach. Co więcej, za sprawą obwodu DC każdy przekształtnik może również niezależnie spełniać dodatkową funkcję równoległego układu poprawy jakości EE oraz – w wypadku dołączenia zasobnika energii – źródła mocy „interwencyjnej” [5, 21, 49, 58, 63]. Podstawy działania sprzęgu „back-to-back”, przy zastosowaniu przekształtników napięcia wyjaśniają wykresy wskazowe przedstawione na rysunku 13 oraz zależności (1)–(5).



Rys. 13. Struktura i zasada działania sprzęgu sieciowego „back-to-back” z pośredniczącym obwodem napięcia stałego

$$P_1 = \frac{V_{F1} \cdot V_{S1}}{X_1} \cdot \sin \delta_1 \quad (1)$$

$$Q_1 = \frac{V_{F1} \cdot V_{S1}}{X_1} \cos \delta_1 - \frac{V_{F1}^2}{X_1} \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{V_{F2} \cdot V_{S2}}{X_2} \cdot \sin \delta_2 \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{V_{F2} \cdot V_{S2}}{X_2} \cos \delta_2 - \frac{V_{F2}^2}{X_2} \quad (4)$$

$$P_1 = P_{DC} = -P_2 \quad (5)$$

gdzie:

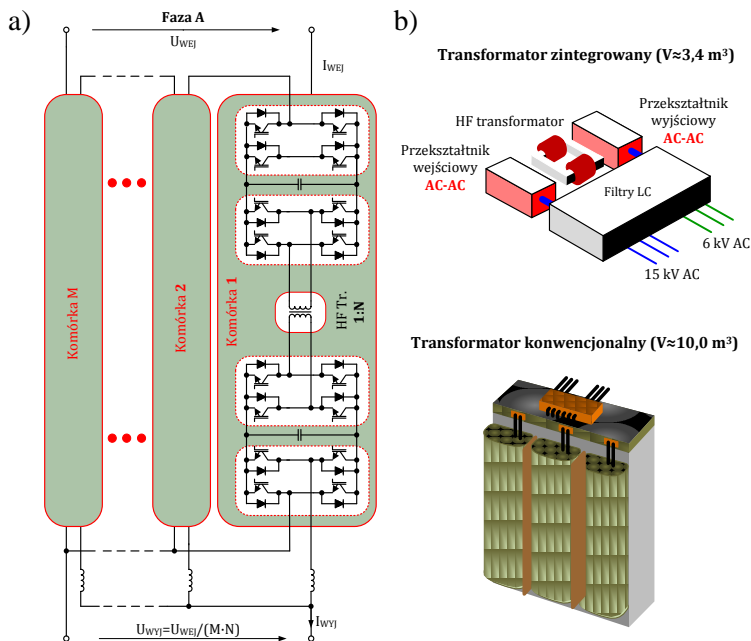
$$P_{DC} = V_{DC1} \cdot I_{DC} = V_{DC2} \cdot I_{DC}$$

W praktyce układy „back-to-back” przyłącza się najczęściej do sieci przez transformatory [17, 23, 25]. Takie przyłącza służą przede wszystkim do dopasowania napięć przekształtnika AC-DC/DC-AC i sprzęganych sieci. Użycie transformatorów jest również wskazane w układach „back-to-back” dopasowanych napięciowo, np. przy zastosowaniu przekształtników wielopoziomowych [52, 68]. W tym wypadku, dzięki separacji galwanicznej, zwiększa się bezpieczeństwo pracy i są łagodzone stany awaryjne. Ponadto transformatory w zrównoległych układach „back-to-back” umożliwiają poprawę kształtu napięcia na zaciskach sprzęgu [23, 24].

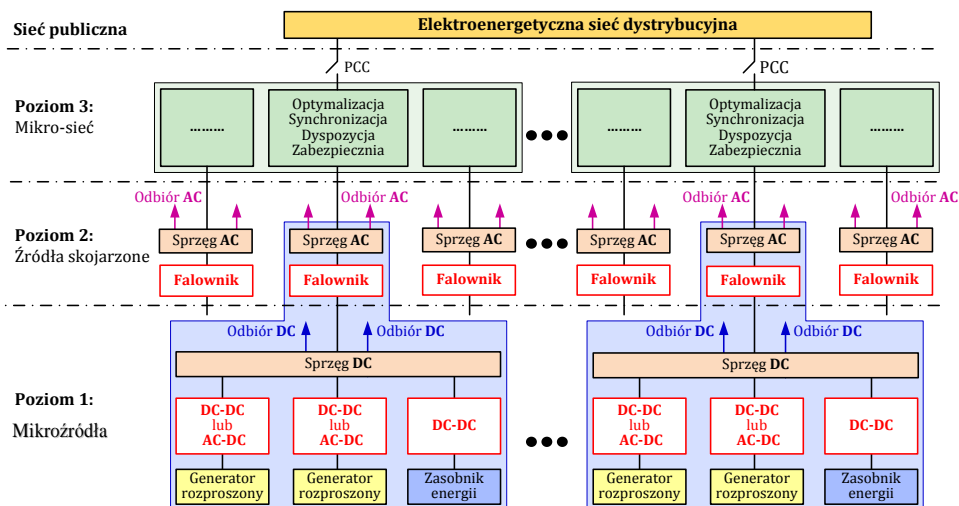
Ponieważ transformatory sieciowe (przyłączeniowe) w istotny sposób zwiększają gabaryty instalacji sprzęgającej, od niedawna są rozwijane nowe układy sprzęgów z separacją galwaniczną za pomocą przetwornicy DC-DC z transforma-

torem wysokiej częstotliwości [29]. Ideę takich układów, zwanych także zintegrowanymi transformatorami dystrybucyjnymi [65], ilustruje schemat przedstawiony na rysunku 14a. Każda faza składa się z M jednakowych komórek przekształtnikowych AC-DC-AC-Tr-AC-DC-AC, połączonych szeregowo po stronie wyższego napięcia, a równolegle po stronie niższego. Możliwe są również i inne połączenia komórek, przy czym zawsze należy zapewnić równomierną obciążalność i równomierny podział napięć. Szacuje się, że zintegrowane transformatory dystrybucyjne dużej mocy i średniego napięcia, zapewniając takie same możliwości funkcjonalne jak typowe sprzęgi „back-to-back”, będą ponadto ok. 3-krotnie mniejsze od transformatorów konwencjonalnych (rys. 14b).

Nowoczesne UE służące do sprzęgania sieci AC i DC oraz dopasowania źródeł alternatywnych i zasobników energii już dzisiaj umożliwiają budowę lokalnych mikrosieci jako części ISEE [30, 31, 34, 35, 40, 48]. Na przykład gdy przyjmie się strukturę mikrosieci jak na rysunku 15, uzyska się dużą elastyczność integracji źródeł rozproszonych i możliwość działania typu „plug-and-play” na każdym poziomie, bez konieczności stosowania rozwiązań niestandardowych. Wiadomo przy tym, że najkorzystniejsze warunki pracy sieci zasilających (w tym mikrosieci) występują w wypadku odbiorów spokojnych o współczynniku mocy $\lambda \approx 1$ [63]. Stąd też takie odbiory są szczególnie pożądane dla odpływów o małej mocy zwarciowej, ograniczającej zarazem możliwości poprawy współczynnika λ przy użyciu sprzęgu sieciowego (jeśli jest stosowany i jeśli może spełniać taką funkcję).



Rys. 14. Zintegrowany transformator dystrybucyjny: a) schemat, b) porównanie z transformatorem konwencjonalnym

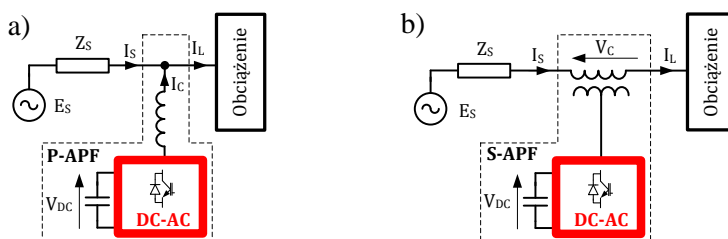


Rys. 15. Struktura hierarchiczna mikro sieci hybrydowej ze sprężami DC i AC

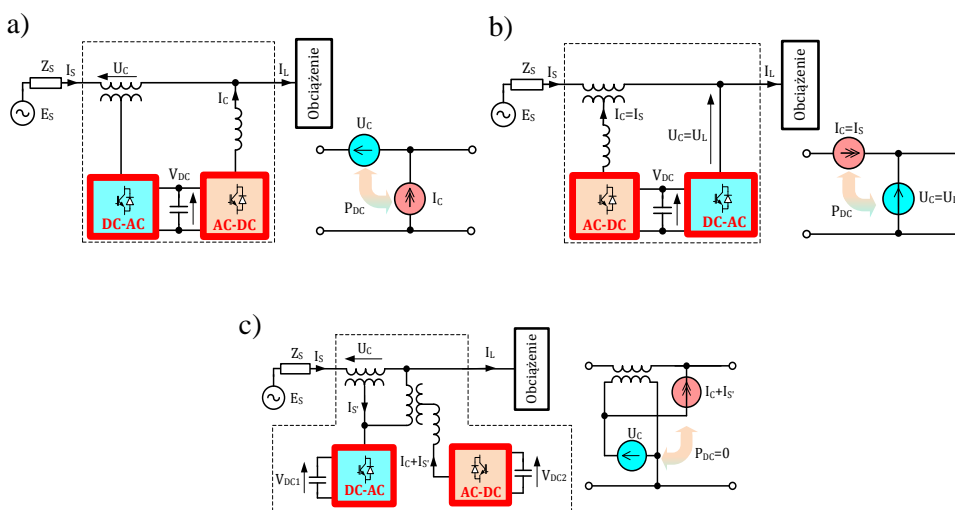
W celu poprawy współczynnika $\lambda < 1$ na odbiornikach lub bezpośrednio na odbiorach (obciążeniu) instaluje się różne układy kompensacyjno-filtracyjne. Spośród stosowanych rozwiązań [62, 63] najbardziej uniwersalne są energetyczne filtry aktywne (APF – *Active Power Filter*) [2, 14, 46, 51, 62, 63], nazywane również aktywnymi kontrolerami jakości energii [49, 50]. Układy APF, w zależności od algorytmu sterowania, umożliwiają łączną lub selektywną kompensację wszystkich niepożądanych składowych prądów lub/i napięć.

Na rysunku 16 przedstawiono dwa podstawowe układy APF: równoległy (P-APF/Parallel-APF) i szeregowy (S-APF/Series-APF). Układ P-APF (rys. 16a) jest przeznaczony głównie do kompensacji prądów, a układ S-APF (rys. 16b) do kompensacji napięć. Niekiedy, układ S-APF stosuje się również do wymuszania pożądanego prądu, a układ P-APF do wymuszania pożądanego napięcia. Wybór układu APF i jego zastosowanie zależą od charakteru obciążenia i sieci oraz od wymogów dotyczących jakości EE [2].

W niektórych przypadkach, dla uzyskania wymaganej jakości odbioru i dostawy EE, muszą być stosowane szeregowo-równoległe układy APF (rys. 17). Te układy, nazywane również UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*) [2, 4, 18, 57], są na ogół budowane jako integralne połączenia P-APF i S-APF o wspólnym obwodzie DC. Wspólnego obwodu DC nie posiada jedynie układ z rysunku 17c [66] – umożliwia to zastosowanie wielopoziomowych przekształtników kaskadowych DC-AC i AC-DC [52, 68].



Rys. 16. Podstawowe układy APF: a) równoległy, b) szeregowy

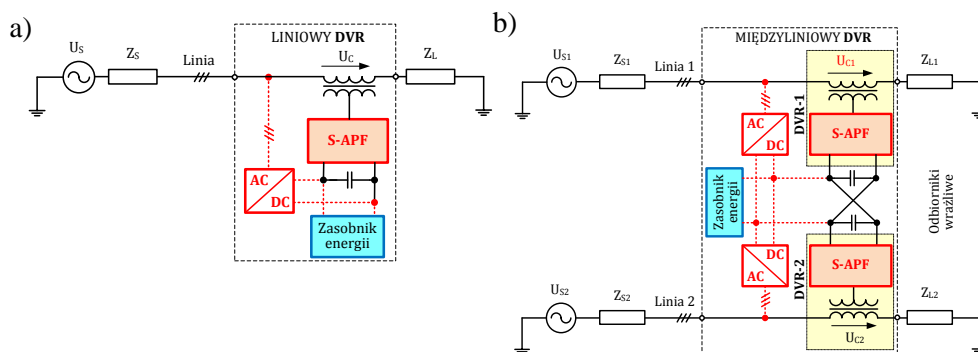


Rys. 17. Szeregowo-równoległe układy APF: a) kompensacyjny, b) wymuszający, c) bez wspólnego obwodu DC

Pewną odmianą filtrów aktywnych, pośrednią między S-APF i UPQC, są układy dynamicznego odtwarzania napięcia – DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) [20, 21, 27, 33, 50, 60]. Ich ogólną budowę i umiejscowienie w systemach dystrybucji ilustruje rysunek 18. W razie zaburzeń napięcia zasilania układ DVR bezzwłocznie odtwarza napięcie wymagane, zabezpieczając właściwe zasilanie odbiornika wrażliwego, z wyjątkiem sytuacji przerw w zasilaniu oraz odchyłen częstotliwości. W szczególności DVR umożliwia kompensację zapadów napięcia.

Ze względu na wymóg generowania lub pobierania mocy czynnej w stosunkowo długim czasie (nawet kilka sekund) układ DVR (w odróżnieniu od S-APF) wyposaża się w dodatkowy zasobnik energii, dołączony do obwodu DC. Niekiedy,

w celu zmniejszenia zasobnika oraz w sytuacjach występowania długotrwałych zaburzeń, stosuje się równoległe przekształtniki AC-DC, podobnie jak w UPQC. Różnica dotyczy typu przekształtnika AC-DC, którym dla DVR może być prostownik diodowy. Oczywiście jest przy tym, że układ UPQC może także działać jako DVR, lecz takie rozwiązanie jest zbyt kosztowne i nieekonomiczne. Mniejszy zasobnik energii jest również potrzebny w układzie międzyliniowego DVR (rys. 18b) – wynika to z możliwości wymiany mocy czynnej między liniami.



Rys. 18. Przykładowe układy DVR: a) liniowy, b) międzyliniowy

4. WYBRANE AUTORSKIE ROZWIĄZANIA PROTOTYPOWE

Ze względu na światową tendencję do rosnącego udziału nowoczesnych UE w SEE, związaną ogólnie z dążeniem do:

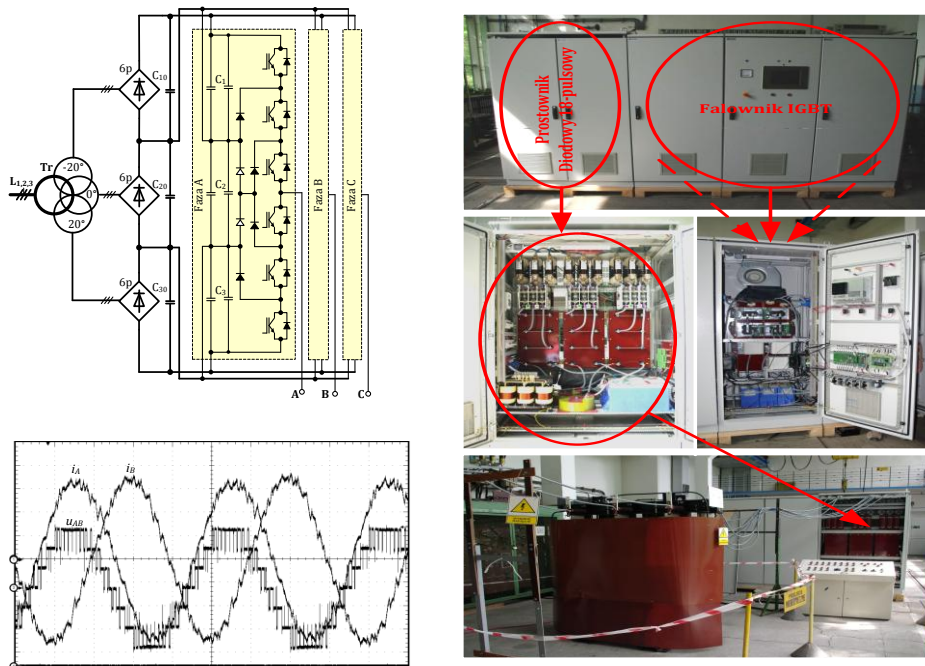
- optymalnego wykorzystania istniejącej infrastruktury elektroenergetycznej, a przez to:
 - zwiększenia bezpieczeństwa dostawy i zapewnienia możliwie najwyższej jakości EE,
 - zmniejszenia strat EE i lepszego wykorzystania mocy zainstalowanych,
 - oszczędności kopalnianych zasobów energetycznych,
 - zmniejszenia liczby dużych inwestycji energetycznych,
 - zabezpieczenia technicznego otwartego rynku EE,
 - zabezpieczenia zasilania nowych wrażliwych technologii
- oraz z nowymi wyzwaniami w zakresie:
- rozwoju i upowszechnienia odnawialnych źródeł EE,
 - przekształcenia obecnych SEE w „inteligentne” SEE,

w ostatnich kilku latach prowadzono prace naukowo-rozwojowe i wdrożeniowe, których częściowymi rezultatami są prezentowane niżej rozwiązania prototypowe.

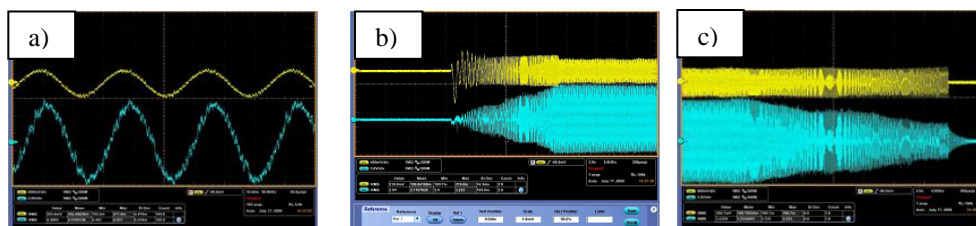
Te rozwiązania, opracowane z udziałem autora, powstały głównie z myślą o aplikacjach w elektroenergetyce.

4.1. Falownik 4-poziomowy 6 kV/1MVA

Prototyp falownika, którego schemat i widok zewnętrzny oraz typowe przebiegi prądów i napięć wyjściowych przedstawiono na rysunku 19, zbudowano w ramach projektu rozwojowego MNiSzW, realizowanego w Akademii Morskiej w Gdyni przy wsparciu Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. W układzie zastosowano tranzystory IGBT typu FD200R65kF1-k i FZ200R65kF oraz sterowniki Concept, wyzwalane przez światłowód. Algorytm sterowania, zaimplementowany w sterowniku DSP, obejmuje modulację wektorową oraz obsługę zabezpieczeń i komunikacji ze sterownikiem nadrzędnym – komputerem przemysłowym [69]. Z komputera zadawane są nadrzędne parametry sterowania, w tym tryb pracy. Falownik zaprojektowano w sposób umożliwiający jego wykorzystanie jako D-STATCOM (po dołączeniu dławików sprzęgających) oraz w układzie napędowym. Ze względu na ograniczenia techniczne w miejscu badań eksperyment przy napięciu 6 kV przeprowadzono tylko w układzie napędowym. Uzyskane wyniki badań, potwierdzające oczekiwany rezultat, ilustrują oscylogramy przedstawione na rysunku 20.



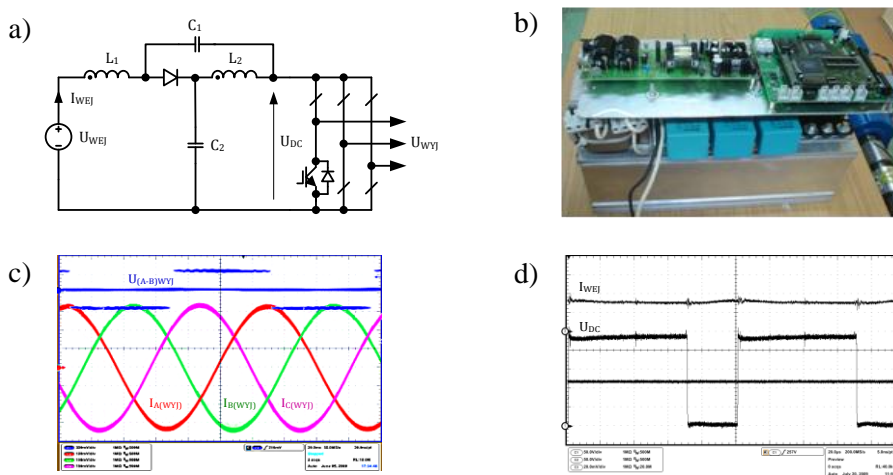
Rys. 19. Schemat, konstrukcja oraz prądy i napięcia na wyjściu prototypowego falownika 4-poziomowego 6 kV/1,0 MVA



Rys. 20. Przebiegi prądu (górną) i napięcia (dół) na zaciskach silnika 6 kV/0,5 kVA przy obciążeniu 200 kW: a) w stanie ustalonym, b) podczas rozruchu, c) podczas hamowania

4.2. Quasi-Z Falownik do źródeł niskonapięciowych

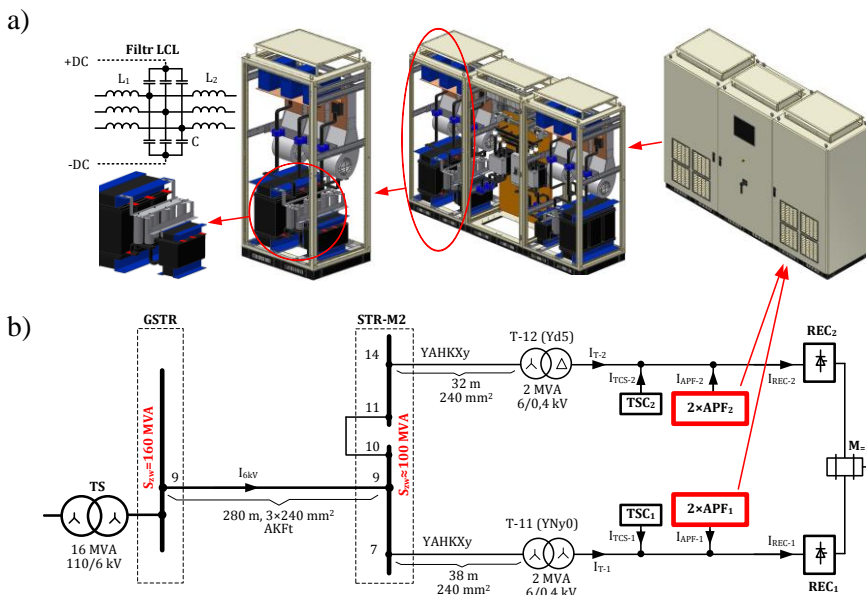
Przedstawiony wstępny prototyp laboratoryjny quasi-Z falownika (rys. 21) powstał na podstawie prac prof. F.Z. Penga [3] i własnych [1, 61], obecnie kontynuowanych w Akademii Morskiej w Gdyni i Instytucie Elektrotechniki w ramach projektów badawczych MNiSZW. Falownik jest przeznaczony do odbiorów 3-fazowych niedużej mocy (1–3 kW), zasilanych z niskonapięciowych źródeł DC, w szczególności z ogniw fotowoltaicznych. Jego zaletami są jednostopniowe przetwarzanie energii i względnie wysoki współczynnik podwyższenia napięcia DC oraz – w porównaniu ze znanymi wcześniej układami typu Z – ciągły prąd wejściowy. W dotychczasowych eksperymentach osiągnięto podwyższenie napięcia z 40 V DC do 180 V AC. Zgłoszone w urzędzie patentowym nowe modyfikacje, w tym układ typu T [1] oraz układ kaskadowy quasi-Z, powinny umożliwić osiągnięcie 400 V AC, co potwierdziły szczegółowe badania symulacyjne. Opracowanym prototypem i wdrożeniem jest zainteresowana jedna z firm krajowych z branży energoelektronicznej.



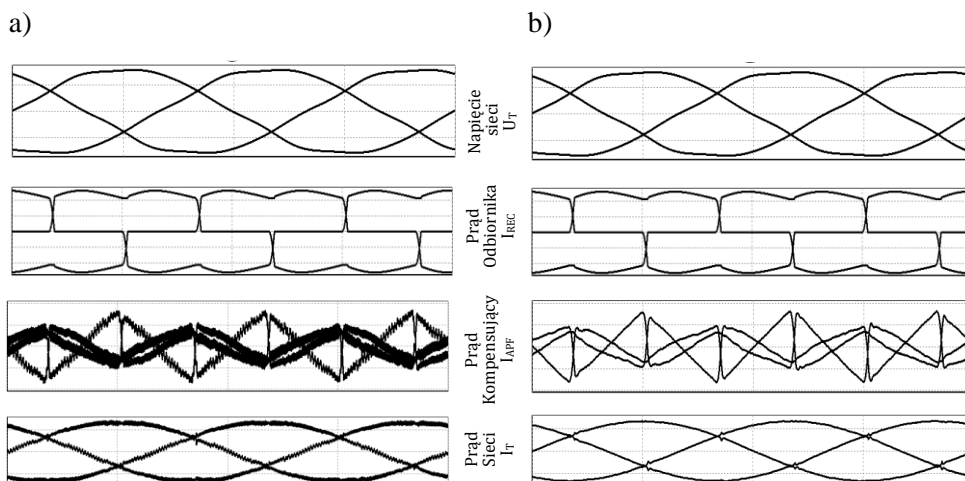
Rys. 21. Układ 3-fazowego falownika typu quasi-Z: a) schemat, b) widok prototypu laboratoryjnego oraz c) i d) oscylogramy prądów i napięć w charakterystycznych miejscach układu

4.3. Układ APF dużej mocy z filtrem sprzęgającym LCL

Energetyczny filtr aktywny z filtrem sprzęgającym LCL został opracowany i uruchomiony w firmie Elmech przy współudziale pracowników Akademii Morskiej w Gdyni i wdrożony w jednej z krajowych kopalni węgla kamiennego w układzie zasilania maszyny wyciągowej (rys. 22). W tej aplikacji, ze względu na specyfikę połączeń uzwojeń transformatorów SN/nn, nie jest konieczna kompensacja 5. i 7. harmonicznej (ze względu na połączenia uzwojeń transformatorów SN/nn). Uwzględnienie tej specyfiki pozwoliło ponad dwukrotnie ograniczyć moc gabarytową każdego z czterech układów APF (do 300 kVA). Oprócz tego, w odróżnieniu od większości analogów krajowych i zagranicznych, zamiast dławika zastosowano filtr sprzęgający LCL. W ten sposób (oraz za pomocą nowatorskiego algorytmu sterowania [67]), udało się osiągnąć jakość kompensacji zdecydowanie wyższą niż w innych znanych układach APF (rys. 23). W subiektywnej ocenie autora opracowany układ można zaliczyć do najlepszych rozwiązań tego typu na świecie.



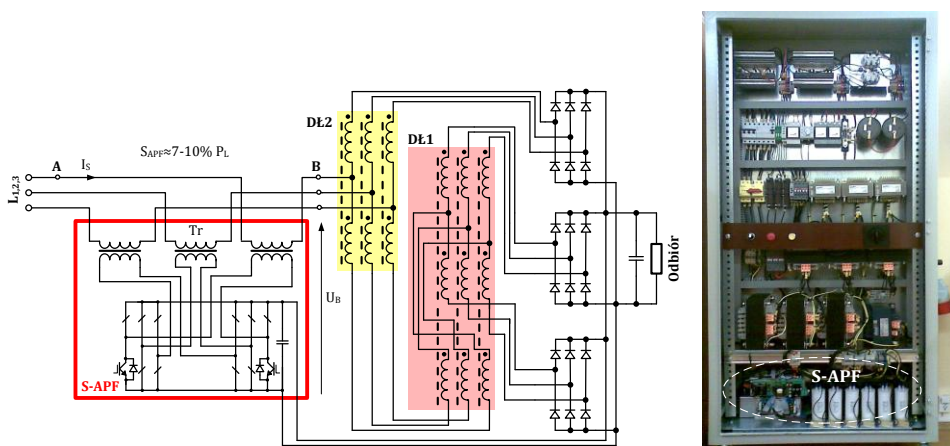
Rys. 22. Energetyczny filtr aktywny z filtrem sprzęgającym LCL: a) konstrukcja, b) schemat połączeń w układzie zasilania maszyny wyciągowej w kopalni węgla kamiennego



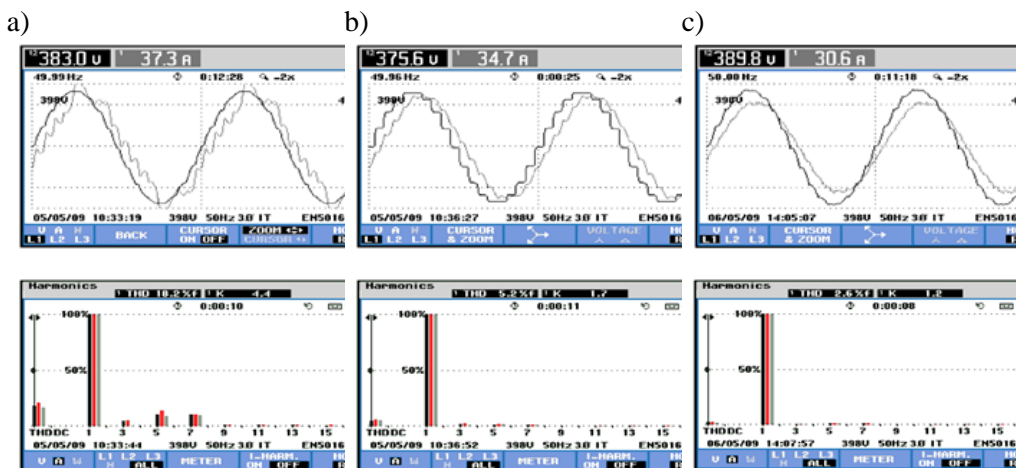
Rys. 23. Wyniki badań porównawczych układu APF: a) z dławikiem sprzęgającym L, b) z filtrem sprzęgającym LCL

4.4. Prostownik 18-pulsowy z dławikami sprzężonymi

Prostowniki wielopulsowe z dławikami sprzężonymi są interesującą alternatywą dla układów transformatorowych w przypadku filtrów pojemnościowych, jeśli nie jest wymagana separacja galwaniczna i są dopasowane poziomy napięcie. Ich główną zaletą jest nieduża moc gabarytowa dławików, parokrotnie mniejsza niż transformatorów. Potwierdzają to prace prowadzone od dłuższego czasu w Akademii Morskiej w Gdyni, obecnie w ramach projektu badawczego MNiSzW. Ich rezultatem jest prototyp laboratoryjny prostownika 18-pulsowego o mocy 20 kW z dodatkowym układem S-APF, przedstawiony na rysunku 24. Ten dodatkowy układ, o mocy gabarytowej równej 8–10% mocy obciążenia, znacząco poprawia jakość prądów wejściowych, w szczególności w wypadku odkształceń i niesymetrii napięcia zasilającego. Ponadto układ S-APF umożliwia stabilizację napięcia DC oraz pozwala wyeliminować (konieczne w innym przypadku) duże dławiki sieciowe. Potwierdzają to oscylogramy przedstawione na rysunku 25. Opracowany prostownik jest przeznaczony do zastosowania w rozproszonych SEE jako jednokierunkowy sprzęg AC-DC.



Rys. 24. Schemat i konstrukcja 18-pulsowego prostownika z dławikami sprzężonymi i dodatkowym układem S-APF



Rys. 25. Przebiegi napięcia U_B na zaciskach wejściowych dławika $D\Delta 1$ oraz przebiegi i widma prądów sieci I_S w zależności od obwodu włączanego między węzłami A-B: a) bez dodatkowego obwodu, b) dławiki sieciowe, c) układ S-APF

5. ZAKOŃCZENIE

Technologie energoelektroniczne pozwalają na pełniejsze wykorzystanie istniejących zasobów dystrybucyjnych i przesyłowych SEE, z zachowaniem, a nawet poprawą dotychczasowego stanu bezpieczeństwa zasilania i jakości EE. Istotne znaczenie ma przy tym skuteczność i szybkość działania nowoczesnych UE, umożliwiających płynną i dynamiczną regulację parametrów, nadążającą za zmianami w odbiorach i w konfiguracji sieci zasilającej. Ważne jest również i to, że takie UE mogą zazwyczaj spełniać wiele różnych funkcji związanych z kondycjonowaniem EE. Wszystko to sprawia, że technologie energoelektroniczne przeznaczone dla SEE zdecydowanie górują nad technologiami tradycyjnymi, opartymi na elementach biernych LC i mechanicznych urządzeniach łącznikowo-sprzęgających.

Przedstawiony materiał w żaden sposób nie wyczerpuje bardzo obszernej tematyki zastosowania UE w SEE. Ze względu na ograniczoną objętość całkowicie pominięto zagadnienia teoretyczne, w szczególności związane ze sterowaniem UE, a także wiele ważnych rozwiązań oraz koncepcji układowych i systemowych. Z większością tych zagadnień można zaznajomić się w cytowanej literaturze. Mimo to autor ma nadzieję, że niniejszy artykuł okaże się inspirujący do poszukiwań nowych efektywnych rozwiązań w omawianym obszarze, oryginalnych w swoich koncepcjach i perspektywicznie ekonomicznie. Ma to szczególne znaczenie w powiązaniu z dyrektywą Unii Europejskiej w sprawie efektywności wykorzystania energii [13], znajdującej również wyraz w przygotowywanej ustawie o efektywności energetycznej [64], w której, jako cel narodowy (rozdz. 2 ustawy) ustala się: a) zwiększenie oszczędności energii przez odbiorców końcowych, b) zwiększenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej, c) zmniejszenie strat energii elektrycznej w przesyłach i dystrybucji. Należy przy tym wziąć pod uwagę, że polityka państwa w zakresie transformacji polskiej energetyki nie wychodzi tylko z kontynuacji scenariusza rozwoju scentralizowanych źródeł energii elektrycznej, ale również z perspektywy znaczącego rozwoju źródeł rozproszonych, w tym odnawialnych [47]. W tym kontekście można się spodziewać, że wraz z rozwojem małej energetyki lokalnej oraz realizacją koncepcji zasilania rozproszonego układy energoelektroniczne, spełniające różne funkcje, staną się standardowym wyposażeniem nowoczesnych podstawy rozdzielczych.

LITERATURA

1. Adamowicz M., Strzelecka N., *T-source inverter*, Przegląd Elektrotechniczny, 2009, 85, nr 10, s. 233–238.
2. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M., *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, John Wiley&Sons 2007.

3. Anderson J., Peng F.Z., *Four Quasi-Z-Source Inverters*, PESC08 2008, s. 2743–2749.
4. Aredes M., Heumann K., Watanabe E., *An universal active power line conditioner*, IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, vol. 13, no2, s. 1453–1460.
5. Benysek G., *Improvement in the Quality of Delivery of Electrical Energy using PE Systems*, Springer 2007.
6. Blaabjerg F., Chen Z., *Power Electronics for Modern Wind Turbines*, Morgan&Claypool Publ., 2006.
7. Blaabjerg F., Chen Z., Kjaer S.B., *Power electronics as efficiency interface in dispersed power generation systems*, IEEE Trans. on Power Electron., 2004, vol. 19, no 5, s. 1184–1194.
8. Boldea I., *Variable Speed Generators*, Taylor & Francis Group, 2006.
9. Bose B.K., *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends*, Academic Press, 2006.
10. Calais M., Myrzik J., Spooner T., Agelidis V.G., *Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems – an overview*, 2002, PESC'02, vol. 4, no 23–27, s. 1995–2000.
11. Carlsson A., *The back to back converter – control and design*, Lund Institute of Technology, 1998.
12. Dunlop J.P., *Photovoltaic Systems*, Amer Tech. Pub, 2009.
13. Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 5 kwietnia 2006 roku w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych.
14. Emadi A., Nasiri A., Bekiarov S.B., *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*, CRC Press, 2005.
15. Emadi A. at al., *Integrated Power Electronic Converters and Digital Control*, CRC Press, 2009.
16. Enjeti P., Palma L., Todorocic M.H., *Power Conditioning Systems for Fuel Cell Applications*, John Wiley&Sons, 2009.
17. Flourentzou N., Agelidis V.G., Demetriades G.D., *VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview*, IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, vol. 24, no 3, s. 592–602.
18. Fujita H., Akagi H., *Unified power quality conditioner: the integration of series and shunt active filter*, IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, vol. 13, no 2, s. 315–322.
19. Gientkowski Z., *Autonomiczne prądnice indukcyjne o wzbudzeniu kondensatorowym i przekształtnikowym*, Wydawnictwa Uczelniane ATR w Bydgoszczy, 1997.
20. Ghosh A., Jindal A.K., Jodhi A., *Design of a capacitor-supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and distorted loads*, IEEE Trans. Power Delivery, 2004, vol. 19, no 1, s. 405–413.
21. Ghosh A., Ledwich G., *Power Quality Enhancement using Custom Power Devices*, Kluwer Academic Pub., 2002.
22. Guerrero M.A., at al., *Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems*, Przegląd Elektrotechniczny, 2009, vol. 85, nr 10, s. 188–195.
23. Hagiwara M., Fujita H., Akagi H., *Performance of a self-commutated BTB HVDC link system under a single-line-to-ground fault condition*, IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, vol. 18, no 1, s. 278–285.
24. Hagiwara M., Wada K., Fujita H., Akagi H., *Dynamic Behavior of a 21-Level BTB-Based Power-Flow Controller Under Single-Line-to-Ground Fault Conditions*, IEEE Trans. on Ind. Applications, 2007, vol. 43, no 5, s. 1379–1387.
25. Han B.M., Baek, S.T., Bae, B.Y., Choi, J.Y., *Back-to-back HVDC system using a 36-step voltage source converter*, IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, 2006, vol. 153, no 6, 677–683.
26. Heier S., Waddington R., *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, WileyBlackwellm, 2006.

27. Huang C.J., Huang S.J., Pai F.S., *Design of Dynamic Voltage Restorer with Disturbance-Filtering Enhancement*, IEEE Trans. Power Electronics, 2003, vol. 18, no 5, s. 1202–1210.
28. Huang Y., Shen M., Peng F.Z., Wang J., *Z-Source Inverter for Residential Photovoltaic Systems*, IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, vol. 21, no 6, s. 176–182.
29. Inoue S., Akagi H., *A Bi-Directional Isolated DC-DC Converter as a Core Circuit of the Next-Generation Medium-Voltage Power Conversion System*, PESC06, 2006, PS1-48, s. 314–320.
30. Ise T., *Advantages and Circuit Configuration of a DC Microgrid*, Symposium on Microgrids, Montreal 2006.
31. Ito Y., Zhongqing Y., Akagi H., *DC microgrid based distribution power generation system*, IP EMC'04, 2004, vol. 3, s. 1740–1745.
32. Januszewski S., Świątek H., Zymmer K., *Przyrządy energoelektroniczne i ich zastosowania*, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2008.
33. Jauch T., Kara A., Rahmani M., Westermann D., *Power quality ensured by dynamic voltage correction*, ABB Rev., 1998, vol. 4.
34. Jiang Z., Yu H., *Hybrid DC- and AC-Linked Microgrids: Towards Integration of Distributed Energy Resources*, IEEE Energy 2030 Conf., Atlanta 2008.
35. Kakigano H. et al., *Fundamental characteristics of DC microgrid for residential houses with cogeneration system in each house*, PES General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
36. Kawamura A., Pavlovsky M., Tsuruta Y., *State-of-the-Art. High Power Density and High Efficiency DC-DC Chopper Circuits for HEV and FCEV Applications*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, 84, nr 9, s. 1–13.
37. Kazimierczuk M.K., *High-Frequency Magnetic Components*, John Wiley&Sons, 2009.
38. Kazimierkowski M., Krishnan R., Blaabjerg F., *Control in Power Electronics*, Academic Press, 2002.
39. Lai J.S., *Power conditioning circuit topologies*, IEEE Ind. Electronics Magazine, 2009, vol. 3, no 2, s. 24–34.
40. Lasseter, R., Paigi P., *Microgrid: a conceptual solution*, PESC'04, 2004, vol. 6, s. 4285–4290.
41. Liu W., Dirker J., Wyk van J.D., *Power Density Improvement in Integrated Electromagnetic Passive Modules with Embedded Heat Extractors*, IEEE Trans. on Power Electronics, 2008, vol. 23, no 6, s. 3142–3150.
42. Luo F.L., *Essential DC/DC Converters*, CRC Press, 2006.
43. Lubośny Z., *Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2006.
44. Machowski J., *Elastyczne systemy przesyłowe – FACTS*, Przegląd Elektrotechniczny, 2002, 78, nr 7, s. 189–196.
45. Massoud S., Wollenberg B., *Toward a smart grid: power delivery for the 21st century*, IEEE Power and Energy Magazine, 2005, 3, no5, s. 34–41.
46. Piróg S., *Energoelektronika: Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*, Komitet Elektrotechniki PAN, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2006.
47. *Potencjał efektywności energetycznej i redukcji emisji w wybranych grupach użytkownika energii. Droga naprzód do realizacji pakietu klimatyczno-energetycznego*, Raport Polskiego Klubu Ekologicznego Okręgu Górnośląskiego w Katowicach we współpracy z Fundacją na Rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii, Katowice 2009.
48. *Power Electronics Handbook*, ed. M.H. Rashid, Academic Press 2006.
49. *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*, Strzelecki R., Benysek G. (eds), Springer, 2008.

50. *Power Quality. Mitigation Technologies in a Distributed Environment*, ed. A. Moreno-Muñoz, Springer, 2007.
51. Quang N.P., *Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in the Practice*, Springer, 2008.
52. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z., *Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications*, IEEE Trans. on Ind. on Electronics, 2002, vol. 49, no 4, s. 724–738.
53. Simões M.G., *Renewable Energy Systems. Design and Analysis with Induction Generators*, CRC Press, 2004.
54. Song Y.H., Johns A.T., *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, IEE Power and Energy Series 30, The Institution of Electrical Engineering, 1999.
55. Sood V.K., *HVDC and FACTS Controllers: Applications of Static Converters in Power Systems*, Springer, 2004.
56. Sourkounis C., Ni B., Richter F., *Comparison of Energy Storage Management Methods to Smooth Power Fluctuations of Wind Parks*, Przegląd Elektrotechniczny, 2009, vol. 85, nr 10, s. 196–200.
57. Strzelecki R., *Właściwości trójfazowego układu UPQC – modelowanie i weryfikacja eksperymentalna*, Przegląd Elektrotechniczny, 2005, 81, nr 11, s. 295–298.
58. Strzelecki R., Benysek G., Dębicki H., *Uniwersalny wielofunkcyjny sprzęg międzysystemowy*, Przegląd Elektrotechniczny, 2004, 80, nr 3, s. 226–232.
59. Strzelecki R., Benysek G., Noculak A., *Wykorzystanie urządzeń energoelektronicznych w systemie elektroenergetycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2003, 79, nr 2, s. 41–49.
60. Strzelecki R., Benysek G., Wojciechowski D., *Układy dynamicznego odtwarzania napięcia. Zastosowanie i właściwości*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, 84, nr 2, s. 33–38.
61. Strzelecki R., Bury W., Adamowicz M., Strzelecka N., *New Alternative Passive Networks to Improve the Range Output Voltage Regulation of the PWM Inverters*, APEC'09, Washington 2009.
62. Strzelecki R., Supronowicz H., *Filtracja harmonicznych w sieciach zasilających prądu przemiennego*, Komitet Elektrotechniki PAN, Adam Marszałek, wyd.1/2, 1998/1999.
63. Strzelecki R., Supronowicz H., *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, 2000.
64. *Ustawa o efektywności energetycznej*, Projekt – wersja 8, Warszawa 15.05.2009.
65. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J., *Smart Grid technologies*, IEEE Industrial Electronics Magazine, 2009, vol. 3, no 2, s. 16–23.
66. Wang J., Peng F.Z., *Unified Power Flow Controller Using the Cascade Multilevel Inverter*, IEEE Trans. on Power Electronics, 2004, vol. 19, no 4, s. 1077–1084.
67. Wojciechowski D., *Novel Controller for 3-Phase Active Power Filter with LCL coupling circuit*, Przegląd Elektrotechniczny, 2009, 85, nr 10, s. 208–112.
68. Wu B., *High-Power Converters and AC Drives*, John Wiley&Sons, 2006.
69. Zymmer K., Zakrzewski Z., Strzelecki R., Szczepankowski P., *Czteropoziomowy falownik napięcia 6 kV typu „Diode clamped”*. Budowa i sterowanie, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, 84, nr 4, s. 4–9.

POWER ELECTRONICS TECHNOLOGY IN MODERN DISTRIBUTION ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS

Summary

The paper discusses the most important areas of application of power electronics arrangements in electrical power systems; especially in distribution systems. Presented examples demonstrate both the need and the purpose of further research and its applications in those fields, as well as they indicate direction of the future research, with special consideration given to research required in Poland. Proposed practical solutions of power electronics arrangements either dedicated or capable of adaptation to the distribution systems illustrate the ability to use potential of Polish national research-development units.