

# UKŁADY ENERGOELEKTRONICZNE W SYSTEMACH DYSTRYBUCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

**Piotr Lipnicki**

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia rolę i miejsce układów energoelektronicznych we współczesnych systemach dystrybucji energii elektrycznej. Wyjaśniono pojęcia sieci inteligentnych i zaprezentowano zestawienie układów energoelektronicznych opisując ich funkcjonalność, możliwości zastosowania i wady. W artykule pokazano wyniki badań dotyczące dynamicznej kompensacji mocy biernej za pomocą układu STATCOM dla farmy wiatrowej. Przedstawiono także różne rodzaje przekształtników mocy. Opisane cechy układów energoelektronicznych pozwalają przypuszczać, że w przyszłości urządzenia te staną się standardowym wyposażeniem użytkowników systemu elektroenergetycznego.

**Słowa kluczowe:** sieci inteligentne, energoelektronika, systemy dystrybucji, FACTS, przekształtniki mocy

## Power electronics devices in power distribution systems

**Abstract.** The article presents the role and the place of power electronics systems in modern distribution systems. The concept of smart grids is explained along with a summary describing their features, possibilities and drawbacks. The paper shows the results of research on the dynamic reactive power compensation with a STATCOM for wind farm. The article presents types of power converters. Presented features of the power electronic devices allow to assume that in the future these devices will become standard equipment for the power system users.

**Keywords:** smart grid, power electronics, distribution systems, FACTS, power converters

## Wstęp

Współczesne dążenia społeczeństw europejskich skupiają się mocno na ochronie środowiska i racjonalnym wykorzystaniu jego zasobów. Zwiększanie roli i znaczenia odnawialnych źródeł energii (OZE), oszczędność energii wraz z lepszym jej administrowaniem to jedne z podstawowych celów przed jakimi staje współczesna energetyka. Z drugiej strony rosną wymagania dotyczące zapewnienia wysokiej jakości energii, ciągłości zasilania, odporności na zakłócenia. Aby sprostać tym wyzwaniom potrzebne jest stworzenie nowych, dedykowanych układów regulacyjnych i metod sterowania nimi.

Coraz szybszy rozwój elementów i układów energoelektronicznych dostarcza operatorom sieci, jak również użytkownikom energii elektrycznej nowych rozwiązań. Wykorzystanie wysokosprawnych przekształtników energoelektronicznych pozwala na stworzenie nowoczesnego, stabilnego systemu energetycznego.

Popularną ideą konsolidującą powyższe założenia jest koncepcja sieci inteligentnych – tzw. „smart grids”. Sieci te są zarządzane w sposób umożliwiający zapewnienie dużej efektywności, niezawodności i zwiększonej możliwości zaopatrywania odbiorców w energię.

Jak pokazano poniżej, układy energoelektroniczne znajdują coraz szersze zastosowanie we współczesnych systemach dystrybucji energii elektrycznej.

## 1. Koncepcja sieci inteligentnych – „smart grids”

Nowe wymagania stawiane systemom elektroenergetycznym zmuszają użytkowników do ciągłego unowocześniania ich sieci. Pojęcie sieci inteligentnej nie jest jednoznacznie definiowane przez międzynarodową społeczność techniczną. Przykładowo Komisja Europejska w swej dyrektywie [1] charakteryzuje „smart grids” jako sieci niezawodne, zapewniające bezpieczeństwo i odpowiednią jakość zasilania przy jednoczesnej elastyczności w przypadku stanów niepewności i zagrożeń. Sieć ta powinna również być ekonomiczna, bez naruszania reguł regulacji i niedyskryminacji stron. Ważnym założeniem jest również elastyczność przy spełnianiu potrzeb konsumentów, we współpracy z użytkownikami – w szczególności z OZE. Porównanie sieci tradycyjnych z sieciami inteligentnymi przedstawia poniższa tabela [2]:

Tabela 1. Porównanie sieci istniejących i inteligentnych: tendencja  
Table 1. Comparison of existing and intelligent networks: tendency

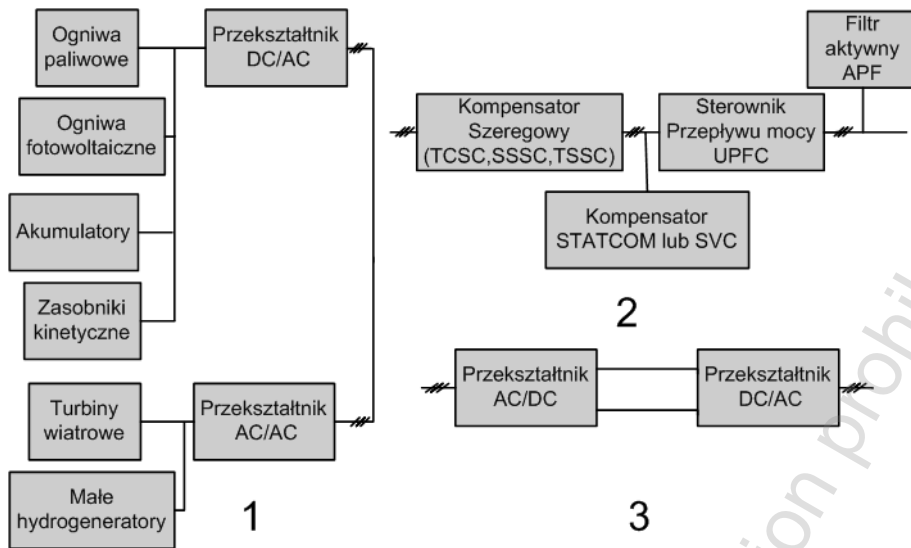
Obszar	Sieć tradycyjna	Sieć inteligentna
Sterowanie	Analogowe, ograniczone	Cyfrowe, wszechobejmujące
Komunikacja	Jednokierunkowa	Dwukierunkowa
Generacja	Scentralizowana	Rozproszona
Architektura	Hierarchiczna	Sieciorowa
Sensory	Nieliczne	Powszechne
Transparentność	Nieprzejrzysta	Samomonitorowanie
Struktury	Ręczne	Samonaprawialność
Działania poawaryjne, awarie	Podatność na zakłócenia	Adaptacyjność, tworzenie struktur wyspowych
Kontrola, testowanie	Ręczne	Zdalne
Wybór przez użytkownika	Niewielki	Wiele wyborów

Jednym z ważniejszych elementów określających sieci „smart grids” jest dwukierunkowy przepływ energii. Pozwala on na odbiór energii przez sieć elektroenergetyczną. Przy zastosowaniu odpowiednich/dodatkových układów energoelektronicznych możliwe jest zapewnienie pracy standardowej sieci z rozproszonymi źródłami energii (RZE). Układy te minimalizują negatywne cechy RZE, takie jak: niestabilność źródła energii, obniżanie niezawodności systemu, pogarszanie jakości energii.

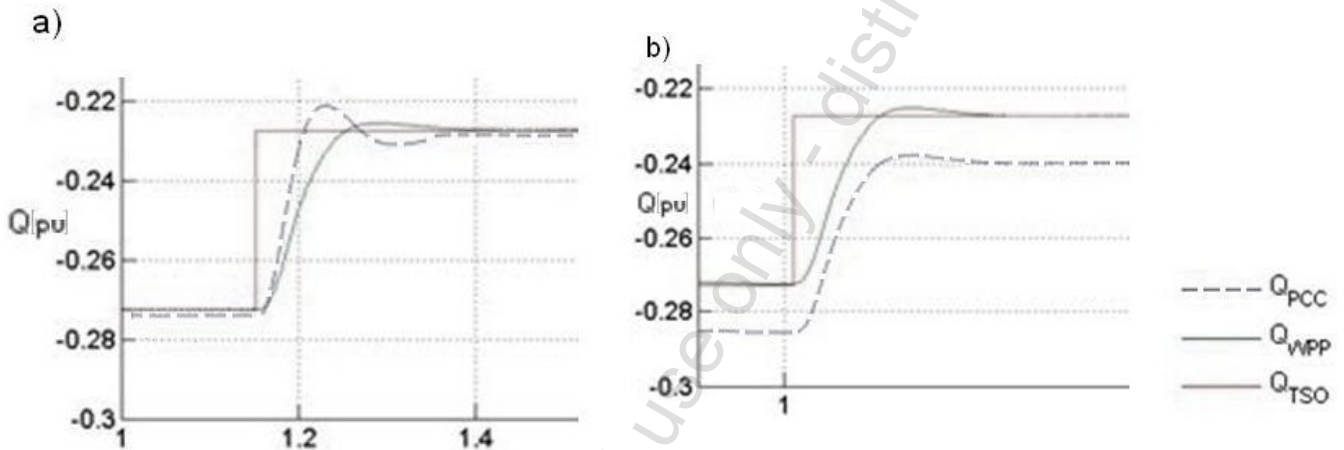
## 2. Energoelektronika w elektroenergetyce

Liczba aktualnych zastosowań układów energoelektronicznych wciąż rośnie. Dominującymi trendami charakteryzującymi rozwój tej branży są dążenie do wysokiej sprawności i niezawodności, z jednoczesnym niskim kosztem przekształtników i ich małymi gabarytami. Ideą energoelektroniki jest sterowanie, dopasowywanie i wysokosprawne przekształcanie energii elektrycznej według potrzeb urządzeń zasilanych. Szereg możliwych funkcjonalnych cech, jakie mogą spełniać układy energoelektroniczne we współczesnych systemach przesyłowych przedstawia rys. 1.

Jedną z podstawowych funkcji, jaką spełniają układy energoelektroniczne jest dostosowanie parametrów i sprzężenie OZE z systemem energoelektrycznym. Takie samo zastosowanie przekształtników odnosi się do zasobników energii elektrycznej, takich jak baterie akumulatorów, czy też zasobniki kinetyczne. Jak pokazują przykłady [3] operatorzy sieci zmieniają wymagania wobec odnawialnych źródeł energii na coraz bardziej rygorystyczne. Często same OZE nie są w stanie sprostać tym wymaganiom – przez co potrzebują zewnętrznych urządzeń wspomagających. Również i w tym przypadku energoelektronika przedstawia odpowiednie rozwiązania.



Rys. 1. Układy energoelektroniczne w elektroenergetyce – 1. Współpraca z OZE i magazynowanie energii, 2. Poprawa jakości i sterowanie przepływem energii elektrycznej, 3. Sprzęganie sieci o innych  $f$ , bądź niedopasowanych systemów  
 Fig. 1. Power electronics in energy systems – 1. Cooperation with the RES and energy storage, 2. Improving the quality and control of the flow of energy, 3. Coupling networks with different  $f$  or mismatched systems



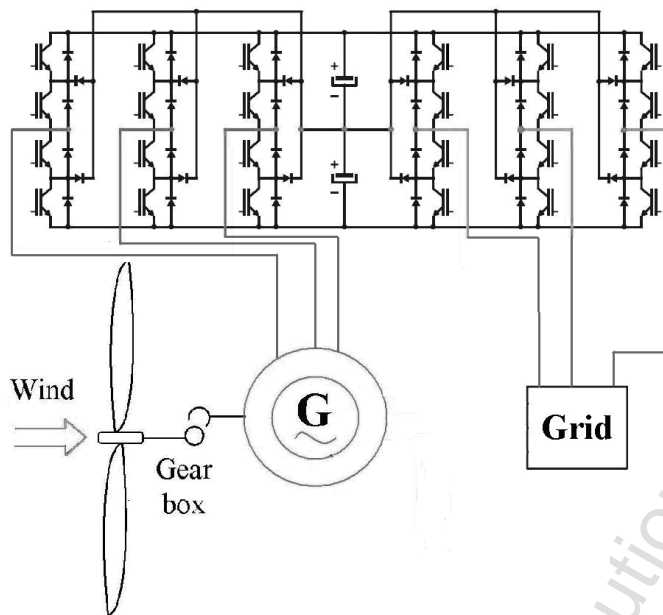
Rys. 2. Charakterystyki przekształtnika mocy WPP pracującego trybie bezpośredniej regulacji mocy (DPC) z różnymi nastawami regulatora PID [3].  $Q_{PCC}$  – moc bierna w punkcie przyłączenia (PCC),  $Q_{WPP}$  – moc bierna generowana przez farmę wiatrową WPP,  $Q_{TSO}$  – skokowe wymagania mocy biernej wysyłane przez operatora sieci (TSO) [3]  
 Fig. 2. Time depended outputs of WPP generator converter working under DPC (Direct Power Control) system on step inputs for different PID corrector settings [3].  $Q_{PCC}$  – reactive power at PCC,  $Q_{WPP}$  – reactive power generated by WPP,  $Q_{TSO}$  – step demand of the TSO [3]

Nowoczesne układy dają możliwość poprawy jakości wraz z odpowiednim sterowaniem przepływem energii elektrycznej. W systemach przesyłu prądem przemiennym rozwiązania związane z jakością energii zostały sklasyfikowane pod pojęciem FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System). Systemy te pozwalają m.in. na [4] kompensację odchyleń wartości chwilowych napięć i prądów, kompensację harmonicznych prądu, blokowanie harmonicznych prądu, blokowanie harmonicznych napięcia, kompensację zapadów i podskoków napięcia, symetryzację napięć, kompensację prądów biernych. Urządzenia można podzielić na dwie grupy [5]: jedna która zmienia rozptył mocy poprzez sterowanie reaktancją sieci, i drugą która używa przekształtników jako sterowanych źródeł napięciowych w celu wstrzykiwania bądź pochłaniania energii. Do pierwszej kategorii można zaliczyć urządzenia takie jak SVC (Static Var Compensator), TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) i TCPS (Thyristor Controlled Phase-Shifter). Do drugiej grupy można zaliczyć następujące urządzenia: statyczny synchroniczny kompensator (STATCOM), statyczny synchroniczny szeregowy kompensator (SSSC), międzyliniowy regulator przepływu mocy (IPFC), zunifikowany regulator przepływu mocy (UPFC).

Dużą zaletą układów z drugiej grupy jest ich płynna, dynamiczna i szybka regulacja parametrów.

Te własności mogą zostać wykorzystane do spełnienia nowych wymagań operatorów sieci względem OZE. Przykładem może tu być zapewnienie odpowiedniego poziomu kompensacji mocy biernej przy farmach wiatrowych [3]. Poniższy rysunek przedstawia charakterystyki wymaganych poziomów mocy biernej dla farmy wiatrowej. Turbiny wiatrowe są w stanie dostarczać moc bierną tylko w pewnym zakresie. Dodatkowo skuteczność ich maleje, co wykazano w [3] wraz z powiększającą się odległością punktu przyłączenia farmy do sieci.

Następną ważną własnością jest możliwość zastosowania ich przy sprzęganiu sieci o różnych parametrach. Najbardziej popularnym rozwiązaniem jest sprzęg DC-DC, czyli układ składający się z dwóch przekształtników i obwodu pośredniczącego DC. Umożliwia on sprawne połączenie dwóch sieci o różnych częstotliwościach. Sprzęgi te stosuje się w systemach przesyłu energii prądem stałym (HVDC – High Voltage Direct Current). Zaletami takich systemów są m.in. [5]: zmniejszone straty przesyłu w stosunku do systemów AC, moc przesyłana jest niezależna od odległości, linie przesyłowe nie wymagają kompensacji mocy biernej.



Rys. 3. Wielopoziomowy przekształtnik dla turbiny wiatrowej [3]  
Fig. 3. Multilevel converter for wind turbine [3]

### 3. Rodzaje przekształtników

Nowoczesne rozwiązania stosowane w elektroenergetyce wymagają stosowania przekształtników energoelektronicznych. W układach przekształtkowych najczęściej stosowanymi elementami półprzewodnikowymi są diody i tyrystory mocy, tyrystory GTO (Gate Turn-Off Thyristor), IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) i tranzystory IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Klasyczne układy przekształtkowe są dwupoziomowe. Przyjęte, jako standardowe, nawet przy mocach rzędu megawatów, posiadają wadę w stosunku do układów wielopoziomowych i modułowych.

Chodzi tu o możliwość taktowania (przełączania) wyłącznie bipolarnego - przełączania pomiędzy maksymalnym i minimalnym potencjałem. To powoduje, że przekształtniki te posiadają następujące wady: wysoką zawartość harmonicznych przy niskich częstotliwościach kluczowania, dużą zmienność napięcia, co prowadzi do wysokich strat przełączeniowych, stosowanie filtrów, jeśli jest wymagane napięcie sinusoidalne.

Alternatywą jest stosowanie układów wielopoziomowych bądź modułowych. Przykład takiego przekształtnika jest zilustrowany na rys. 3 [3].

Sterowanie takich przekształtników jest bardziej skomplikowane, ale samo rozwiązanie posiada szereg zalet. Są to m.in.: zapewnienie niskiej zawartości harmonicznych poprzez zapewnienie odpowiedniej ilości modułów, zagwarantowanie redundancji urządzenia poprzez użycie większej ilości modułów do uzyskania napięcia wyjściowego, aby w razie awarii nie była wymagana natychmiastowa naprawa.

Istnieje wiele metod modulacji, które można zastosować przy sterowaniu przekształtnikiem wielopoziomowym [6]. Są to m.in.: metoda schodkowa, metoda eliminacji wybranych harmonicznych, metoda wektorowa, metoda z sygnałem nośnym oraz metoda hybrydowa. Różne metody są stosowane w wielu aplikacjach, pozwalając na odpowiednie dostosowanie przekształcania energoelektronicznego według określonych parametrów.

### 4. Podsumowanie

Zastosowanie nowoczesnych układów energoelektronicznych pozwala na spełnienie najnowszych norm operatorów sieci. Układy te dają możliwość głębszego i bardziej spójnego wykorzystania istniejących struktur systemów elektroenergetycznych. Pozwalają na poprawę jakości energii, a także bezpieczeństwa zasilania. Współczesne rozwiązania posiadają zazwyczaj możliwość realizacji wielu funkcji jednocześnie. Rozwój energii odnawialnej, dążenie do rozwijania energetyki lokalnej wraz z wdrażaniem koncepcji systemów rozproszonych pozwala założyć, że układy energoelektroniczne staną się standardowym wyposażeniem elementem systemów elektroenergetycznych.

### Literatura

- [1] Dyrektywa 2009/72/UE o obowiązku wdrażania inteligentnych systemów pomiarowych.
- [2] Malko J.: „Smart” w energetyce – moda czy konieczność?. Seminarium AGH 2010, Kraków.
- [3] Lipnicki P.: „Kompensacja mocy biernej w elektrowni wiatrowej”, Politechnika Lubelska, 2010
- [4] X.P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal "Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control", ISBN-13 978-3-540-30606-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [5] Strzelecki R., Benysek G., „Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks”, ISBN 978-1-84800-317-0, Springer-Verlag London 2008
- [6] Zygmantowski M.: „Analiza porównawcza właściwości wybranych wielopoziomowych przekształtników energoelektronicznych przeznaczonych do układów kondycjonowania energii elektrycznej”, Politechnika Śląska, 2009

**Mgr inż. Piotr Lipnicki**  
e-mail: Piotr.Lipnicki86@gmail.com

Jest absolwentem Politechniki Lubelskiej i Uniwersytetu Technicznego w Aalborgu. Zajmował się zagadnieniem kompensacji mocy biernej dla farm wiatrowych. Pracował nad zagadnieniem sterowania przekształtników napięciowych połączonych równolegle. Interesuje się zagadnieniem sieci inteligentnych „smart grids”, w pracy doktorskiej zajmuje się algorytmami synchronizacji z przekształtników energoelektronicznych z siecią.

