

ENERGOELEKTRONIKA (ROZWÓJ I ZNACZENIE)

Energoelektronika jest nowoczesnym kierunkiem rozwoju nauki i techniki w zakresie dyscypliny elektrotechnika. Jest silnie powiązana z mikroelektroniką. Obejmuje teorię, projektowanie, wytwarzanie i zastosowanie układów elektrycznych z łącznikami półprzewodnikowymi przeznaczonych do przekształcania energii elektrycznej, jak również do sterowania mocy doprowadzanej do odbiornika. Energia elektryczna dostępna z konwencjonalnych źródeł takich jak sieć elektroenergetyczna prądu przemiennego, autonomiczne prądnice prądu przemiennego i stałego oraz niekonwencjonalnych, jak n.p.: baterie chemiczne, ogniwa paliwowe i słoneczne jest z punktu widzenia użytkownika tylko półproduktem wymagającym odpowiedniego ulepszenia, czyli optymalnego dostosowania jej do zasilania różnorodnych odbiorników. Energię dostarczoną ze wspomnianych źródeł charakteryzują na ogół stałe wartości napięcia i częstotliwości, a ponadto sinusoidalny przebieg napięcia prądu przemiennego. Wartości napięcia, prądu i częstotliwości wymagają w zależności od rodzaju odbiornika zmiany jak też i regulacji w szerokim zakresie. Istnieje również potrzeba generowania okresowych i nieokresowych przebiegów o dowolnym kształcie przy dużej szybkości ich zmian. Energia elektryczna jest luksusową postacią energii. Trudno wyobrazić sobie rozwój cywilizacyjny świata w przypadku bardzo ograniczonego dostępu do tej energii. Wobec wyczerpujących się zasobów surowcowych oszczędność energii jest podstawowym zadaniem. Warto zwrócić uwagę, że energia elektryczna zużytkowana w odbiorniku to niekiedy mniej niż trzydzieści procent energii chemicznej przetwarzanej w energię cieplną w węglu kamiennym (sprawność elektrowni nie więcej niż czterdzieści pięć procent, dochodzą straty przesyłu oraz straty przetwarzania w maszynie roboczej). Dlatego też proces przetwarzania energii elektrycznej powinien odbywać się przy możliwie najmniejszych stratach. Nowoczesne półprzewodnikowe układy energoelektroniczne charakteryzuje bardzo wysoka sprawność, nieosiągalna w żadnych innych układach (np. układach elektromechanicznych).

Termin energoelektronika pojawił się w języku technicznym z początkiem lat siedemdziesiątych (*ang.* Power electronics; *niem.* Leistungselektronik). Aczkolwiek pierwsze prace teoretyczne oraz zastosowania praktyczne układów energoelektronicznych odnosi się do pierwszej połowy ubiegłego wieku, to jednakże rozwój energoelektroniki datuje się dopiero od 1957 roku, tj. od roku, w którym wyprodukowano po raz pierwszy sterowany krzemowy zawór półprzewodnikowy o strukturze czterowarstwowej – tyrystor. Stosowane wcześniej prostowniki rtęciowe zostały zastąpione przez układy tyrystorowe. Krzem jest idealnym izolatorem (pierwiastek czterowartościowy). Wprowadzenie

odpowiednich domieszek, pięcio- i trójwartościowych, zmienia jego właściwości elektryczne. Warto sobie zdać sprawę, że po wprowadzeniu domieszki w ilości jednego mg do jednej tony krzemu otrzymuje się półprzewodnik.

W ostatnich kilkudziesięciu latach nastąpił bardzo intensywny rozwój różnych odmian półprzewodnikowych przyrządów mocy – tyrystorów oraz bipolarnych i polowych tranzystorów mocy o coraz większych parametrach granicznych (prądy, napięcia, czasy wyłączenia). Dostępne są przyrządy o prądach do kilku tysięcy amperów, i napięciach do 10 kV, o czasach wyłączenia od kilkudziesięciu nanosekund do kilkudziesięciu mikrosekund. W układach energoelektronicznych przyrządy półprzewodnikowe pracują dwustanowo. W stanie nieprzewodzenia blokują napięcie anodowe wykazując oporność rzędu kilkudziesięciu megaomów, natomiast w stanie przewodzenia spadek napięcia wynosi przeciętnie od kilkuset mV do 1,5 V.

Czasy wyłączenia mają decydujący wpływ na częstotliwość łączeń. I tak na przykład tyrystory wyłączalne prądem bramki mogą pracować z częstotliwością łączeń rzędu kilkadziesiąt kHz, tranzystory z izolowaną bramką – kilkuset kHz, natomiast tranzystory polowe – kilku MHz. Wysoka częstotliwość łączeń umożliwia kształtowanie dowolnego przebiegu napięcia lub prądu.

Wyróżnia się cztery podstawowe funkcje przekształtników:

1. przekształcanie napięcia przemiennego na stałe (AC/DC)
2. przekształcania napięcia przemiennego na przemienne (AC/AC)
3. przekształcanie napięcia stałego na przemienne (DC/AC)
4. przekształcanie napięcia stałego na stałe (DC/DC)

Współczesny przemysł energoelektroniczny wytwarza układy o mocach wyjściowych od kilkudziesięciu watów do kilkudziesięciu (nawet kilkuset) mW. Częstotliwość napięć wyjściowych wynosi od zera do kilku MHz. Należy dodać, że duże częstotliwości napięć wyjściowych odnoszą się do odbiorników małej mocy, natomiast małe częstotliwości do odbiorników dużej mocy.

Układy energoelektroniczne stosowane są we wszystkich gałęziach przemysłu. Ocenia się, że w krajach silnie uprzemysłowionych o nowoczesnej technologii około 80 procent wytwarzanej energii ulega przekształceniu przy użyciu urządzeń energoelektronicznych.

Przykłady zastosowań:

- elektroliza i galwanotechnika
- napęd elektryczny (m.in. w transporcie kolejowym, morskim, drogowym i powietrznym)
- grzejnictwo oporowe, indukcyjne i pojemnościowe
- przesył i poprawa jakości zasilania energią elektryczną
- bezprzerwowe zasilanie

- zasilanie pojazdów kosmicznych
- systemy ultradźwiękowe
- zasilanie radarów, laserów i urządzeń rentgenowskich

Należy podkreślić, że postęp technologiczny w budowie wysoko sprawnych półprzewodnikowych łączników mocy i układów energoelektronicznych o bardzo dużej niezawodności pracy wywarł znaczący wpływ na postęp technologiczny urządzeń użytkujących energię elektryczną. Można tu zauważyć również wpływ odwrotny. I tak np. dokonał się bardzo znaczący wpływ na rozwój nowoczesnej techniki napędu elektrycznego. Wyeliminowane zostały zespoły wielomaszynowe w przetwarzaniu energii elektrycznej na mechaniczną, bardzo znacząco wzrosła sprawność układów napędowych, silniki prądu stałego zostały w przeważającej mierze zastąpione tańszymi i bardziej niezawodnymi silnikami prądu przemiennego. Interesującym przykładem jest napęd silnikiem synchronicznym zasilanym z pośredniego przemiennika częstotliwości (pośredniczący obwód prądu stałego), którego prędkość obrotowa jest regulowana przez zmianę wartości napięcia prądu stałego. W tym to przypadku maszyna synchroniczna nabiera właściwości maszyny prądu stałego.

W dalszej części wykładu ograniczę się do omówienia zastosowań układów przekształtnikowych w systemach energetycznych (aktualna i ważna tematyka prowadzonych prac badawczych i zastosowań praktycznych).

Przesył energii prądem stałym (HVDC – Transmission)

Systemy przesyłu energii prądem stałym należą do jednych z głównych użytkowników nowoczesnych układów elektronicznych dużej mocy. Stosuje się je do przesyłu dużej mocy na znaczne odległości za pomocą linii napowietrznych, do przekraczania cieśnin morskich kablami morskimi, do głębokiego wprowadzania linii kablowych w aglomeracje miejskie i przemysłowe oraz do sprzęgania systemów energetycznych prądu przemiennego do wspólnej pracy (m.in. o różnych mocach zwarciovych i różnych częstotliwościach prądu przemiennego). W porównaniu z przesyłem energii prądem przemiennym, przesył energii prądem stałym wykazuje szereg zalet, np.:

- straty przesyłu maleją o 33 procent
- brak efektu naskórkowości
- mniejsze straty ulotu (na koronę)
- moc przesyłu jest niezależna od odległości
- linia przesyłowa nie wymaga kompensacji mocy biernej
- łatwość sterowania przepływem energii i tłumienia wolnozmiennych oscylacji mocy w stanach dynamicznych i awaryjnych systemów AC

Wadą systemów HVDC jest dość znaczny koszt stacji energoelektronicznych, pobór mocy biernej oraz generowanie wyższych harmoniczných prądów przez przekształtniki (AC/DC, DC/AC). Istotnymi składnikami systemów HVDC są stacje przekształtnikowe łączące sieci prądu przemiennego z końcami linii prądu stałego. Stacje te wyposażone są w dwunastopulsowe prostowniki. W obwód prądu stałego jest włączony dławik o indukcyjności 300-600 mH. Obwód prądu stałego ma charakter źródła prądowego, co oznacza jednokierunkowy przepływ prądu niezależnie od kierunku przepływu energii oraz dwukwadrantową pracę przekształtników (praca prostownikowa i falownikowa). Ocenia się, że przesył energii prądem stałym jest opłacalny, w przypadku gdy długość linii napowietrznej przekracza 500-800 kilometrów, a długość kabli podmorskich – 50 km i kabli podziemnych – 100 km. Przy mniejszych odległościach dominuje koszt stacji energoelektronicznych. W świecie czynnych jest około sto systemów przesyłu energii prądem stałym, w tym ponad 20 sprzęgieł (łącz) asynchronicznych. Przykłady wybranych systemów HVDC podaje tablica. Najczęściej stosowane są napięcia prądu stałego ± 500 kV. Rozważa się możliwość zwiększenia tego napięcia do wartości ± 800 kV. Istotnym postępowaniem w rozwoju systemów przesyłu energii prądem stałym było w 1972 roku zastąpienie wysokonapięciowych prostowników rtęciowych w łączu asynchronicznym Eel-River w Kanadzie prostownikami tyrystorowymi. W stacjach przekształtnikowych stosowane są tyrystory o napięciach znamionowych 8-9 kV, średnicy krążka półprzewodnika 150 mm i prądach do 3500 amperów. Tyrystory łączone są szeregowo (50 do 100 na jedną fazę) i sterowane za pomocą światłowodów. Podejmowane są próby zastosowania wysokonapięciowych fototyristorów (light triggered thyristor), dzięki którym będzie możliwe wyeliminowanie złożonych układów elektronicznych służących do generacji impulsów wyzwalaających tyrystory. W pracach badawczych rozważa się możliwość zastosowania tyrystorów wyłączalnych (GTO) i wysokonapięciowych tranzystorów z izolowaną bramką (IGBT – 4,5 kV) w przekształtnikach współpracujących ze źródłem napięciowym (VSC – Voltage Source Converter). W tym przypadku stosowane są w przekształtniku łączniki dwukierunkowe. W obwodzie prądu stałego zamiast dławika stosuje się równolegle włączoną baterię kondensatorów. Takie rozwiązanie jest możliwe dzięki ogromnemu postępowi technologicznemu w budowie kondensatorów na wysokie napięcia prądu stałego.

Przykłady HVDC Transmission

Rok	Napięcie KV	Moc MW	Odległość km	Lokalizacja	Linia przesyłowa
1882	2	0,011	57	Miesbach-Munchen	napowietrzna
1906	125	0,020	150	Mountiers-Lyon	napowietrzna
1939	50	0,5	20	Wettinger-Zurich	napowietrzna
1954	100	20	20	Gotland (Szwecja)	Gotland (Szwecja)

1965	±40	±500	470	Wołgograd-Donbas	napowietrzna
1986	±270	2000	144	Anglia-Francja	kabel morski i podziemny
1970	±400	1440	1362	Pacyfic-Interie (USA)	napowietrzna
1985	±500	1000	1362	Pacyfic-Interie (USA)	napowietrzna
1989	±500	3100	1362	Pacyfic-Interie (USA)	napowietrzna
1983	±500	1800	930	Nelson-River (Kanada)	napowietrzna
1979	±533	1940	1414	Mozambik	napowietrzna
1987	±600	6300	806	Brazylia	napowietrzna
1988	±500	1200	1080	Chiny	napowietrzna
1990	±500	1000	1000	Indie	napowietrzna
1990	±500	1800	1000	Meksyk	napowietrzna
	±750	6000	2500	Kazachstan	napowietrzna
1984	140	1000	-	Kanada	łącze asynchroniczne
1984	±85	1070		Rosja-Finlandia	łącze asynchroniczne 50/60 Hz
2000	±450	600		Szwecja-Polska	kabel podmorski

Poprawa jakości zasilania

W idealnym systemie elektroenergetycznym AC utrzymywana jest stałość napięcia i jego częstotliwości, sinusoidalny przebieg napięcia, brak składowej przeciwnej i zerowej w systemie trójfazowym oraz bliski jedności współczynnik mocy. Dobrze znane są skutki w przypadku, gdy wspomniane wielkości znacznie odbiegają od wartości znamionowych. Wzrastająca liczba odbiorników nieliniowych (przekształtniki dołączone do sieci prądu przemiennego), jak również odbiorników niespokojnych (piece łukowe, szybko nawrotne napędy elektryczne) oraz odbiorników niesymetrycznych (jednofazowe nagrzewnice indukcyjne) powoduje istotne, na ogół niedopuszczalne pogorszenie jakości zasilania i znaczne utrudnienie regulacji napięcia w różnych punktach odbioru energii. Współczesna technologia umożliwia realizację układów energoelektronicznych, wyposażonych w nowoczesne, mikroprocesorowe systemy sterowania, zdolnych do kompensacji zakłóceń wprowadzanych do sieci prądu przemiennego, a więc do poprawy jakości zasilania. I tak np. konwencjonalny kompensator mocy biernej złożony z równoległego połączenia stałej baterii kondensatorów i tyrystorowego regulatora prądu indukcyjnego stanowi regulowaną susceptancję umożliwiającą zarówno dostarczenie do sieci, jak też i pobieranie z niej mocy biernej. Szybka reakcja układu na zmianę sygnału sterującego czyni ten układ przydatnym do kompensacji szybko zmiennych mocy biernych. Dzięki zaawansowanej technologii układów energoelektronicznych opracowane zostały statyczne kompensatory mocy biernej równoważne wirującym synchronicznym kompensatorom. Podstawowym układem statycznego kompensatora jest przekształtnik w układzie falownika napięcia z łącznikami dwukierunkowymi sterowany przy

wykorzystaniu techniki modulacji (PWM). W zależności od znaku różnicy napięć wyjściowego falownika i sieci prądu przemiennego moc bierna jest oddawana lub pobierana ze źródła zasilania. Kompensatory dużej mocy i wysokich napięć budowane są jako kaskadowe połączenie jednofazowych falowników napięcia (układy mostkowe). Połączenie takie umożliwia generowanie na wyjściu kompensatora napięcia o przebiegu wieloschodkowym o małej zawartości wyższych harmonicznych. Kompensatory te (STATCOM) stosowane są zarówno do sterowania przepływu mocy biernej jak również do poprawy stabilności systemu, a więc do realizacji elastycznego systemu przesyłowego (FACTS). Przykładem jest układ o mocy ± 50 MVar, 13 kV opracowany w jednym z uniwersytetów USA. Istotnym problemem jest kompensacja wyższych harmonicznych prądów generowanych przez odbiorniki nieliniowe. Zastosowanie znajdują energoelektroniczne filtry aktywne, równoległy i szeregowy. Filtr aktywny równoległy złożony z falownika napięcia dołączonego do sieci prądu przemiennego przez dławik kompensuje prąd odkształcenia generowany przez odbiornik. Filtr szeregowy o podobnej topologii jak równoległy jest połączony szeregowo z linią zasilającą poprzez transformator. Kompensuje on wyższe harmoniczne napięcia pochodzące od wyższych harmonicznych prądu odbiornika. Nowoczesna technologia umożliwia budowę przekształtników AC/DC i DC/AC posiadających cechy odbiorników liniowych. Przy wykorzystaniu techniki PWM oraz techniki wielopulsowej (18 i 24) jest możliwe zmniejszenie współczynnika odkształcenia prądu pobieranego ze źródła zasilania (THD) do wartości 1 do 2 % (Clean Power Converter).

Ogniwa paliwowe i słoneczne

Ogniwa paliwowe i słoneczne dostarczają energię o napięciu stałym. Napięcie stałe jest przekształcane dla potrzeb odbiorców na napięcie przemiennie trójfazowe na ogół o częstotliwości 50 lub 60 Hz przy zastosowaniu energoelektronicznych falowników napięcia. Nastąpił znaczny postęp w nowoczesnej technologii ogniw paliwowych. Dostępne są ogniwa paliwowe o mocy 200 kW. Przeprowadzone zostały pomyślne badania prototypów o mocy 1000 kW. Przewiduje się zastosowanie ogniw paliwowych do zasilania określonych obiektów, np. szpitali oraz w samochodach z napędem elektrycznym.

Dynamicznie wzrasta liczba gospodarstw domowych korzystających z energii elektrycznej wytwarzanej przez elektrownie słoneczne. Przewiduje się, że w 2040 roku w przemyśle fotowoltaicznym (European Photovoltaic Industry Association), dzięki rozwijającej się technologii oraz inwestycjom znajdzie zatrudnienie co najmniej 2 mln pracowników (oraz zmniejszenie emisji CO₂ o 350 mln ton rocznie). Sprawność produkowanych fotoogniw wynosi około 16 %. Z dostępnej literatury wynika, że jest możliwe podwyższenie tej sprawności co najmniej dwukrotnie. Ogniwo słoneczne o powierzchni 1 m² dostarcza energię elektryczną o mocy 100 W. Prowadzone są badania nad tekstylnymi panelami słonecznymi (giętkie komórki ogniw słonecznych umieszczone na tradycyjnej tkaninie, eliminacja

ciężkiego, płaskiego, sztywnego, łamliwego szkła). Stale maleje cena paneli słonecznych. Czas użytkowania paneli ocenia się na 40 lat. Obecnie w Hiszpanii budowana jest największa na świecie elektrownia słoneczna. Powierzchnia parabolicznie ułożonych paneli wynosi 510 tysięcy m². Roczna produkcja energii elektrycznej wyniesie 180 GWh, a moc około 50 MW. W Chinach na pustyni Gobi przewiduje się budowę elektrowni słonecznej o mocy 100 MW. Są to już znaczące dla elektroenergetyki moce.

Dydaktyka

Z początkiem lat siedemdziesiątych powołana została na wydziale elektrycznym Politechniki Warszawskiej specjalność energoelektronika. Za przykładem Politechniki Warszawskiej poszły inne wyższe uczelnie techniczne w kraju.

Energoelektronika ma interdyscyplinarny charakter. Proces dydaktyczny jest powiązany z następującymi przedmiotami wchodzącymi w zakres elektrotechniki:

- elektronika (układy analogowe i cyfrowe)
- technika komputerowa (projektowanie i symulacja układów)
- teoria sygnałów
- miernictwo elektryczne
- maszyny i urządzenia elektryczne
- przesył i rozdział energii elektrycznej
- teoria sterowania (wybrane zagadnienia)

Przedmiot podstawy energoelektroniki jest już obowiązujący dla wszystkich specjalności prowadzonych na wydziale elektrycznym.

W kraju obserwuje się wzrost liczby małych przedsiębiorstw produkujących układy energoelektroniczne. Wzrasta zapotrzebowanie na inżynierów o profilu energoelektronika. Obecnie zauważalny jest brak dopływu do przemysłu dobrze wyszkolonych specjalistów z zakresu energoelektroniki. Wynika to stąd, że maleje zainteresowanie młodzieży studiami o kierunku elektrotechnika na korzyść informatyki. Potrzebna jest szeroka akcja wśród kandydatów na studia, informująca zarówno o treści nauczania jak też i znaczeniu dla przemysłu nowoczesnej elektrotechniki (a w tym i energoelektroniki) oraz o możliwościach zatrudnienia.

Dziękuję za uwagę.