

Koniec wojny i początek koegzystencji dwóch prądów – stałego i przemiennego

End of war and beginning of the coexistence of two currents – alternating and direct ones

Sztandarowy organ amerykańskiego Stowarzyszenia Elektroenergetyków – *IEEE Power & Energy Magazine* - po raz drugi w okresie kilkumiesięcznym powraca do tematyki współistnienia „dwóch prądów”. Niedawno numer listopadowo-grudniowy 2012 poświęcono w całości tej problematyce, prezentując 9 artykułów problemowych (łącznie z artykułem „okładkowym” - cover story), autorstwa wybitnych specjalistów z dziedziny. Przewodnik po tym numerze dwumiesięcznika zainteresowany czytelnik znajdzie w czasopiśmie Polskiego Towarzystwa Ekologicznego, w artykule pod tytułem „Wojna prądów – początek drugiego starcia” [1]. Numer majowo-czerwcowy *P&EM* zawiera publikację zespołu czterech naukowców z Uniwersytetu Technicznego w Singapurze [2]. Autorzy unikają podejścia konfrontacyjnego („wojna prądów”), podkreślając możliwości łączenia zalet i eliminacji wad obydwu rodzajów prądów w dążeniu do stworzenia hybrydy AC/DC jako perspektywicznego rozwiązania dla systemu elektroenergetycznego. Mamy zatem zjawisko odejścia od bezwzględnej konkurencji („kto kogo?”) do kooperacji („kto z kim?”). Stulecie rozwoju technologii przemiennoprądowych sprawiło, iż system elektroenergetyczny AC stał się spoiwem postępu i osiągnięć technicznych cywilizacji XX wieku.

„Ale czy oznacza to, że DC odszedł w niebyt? Odpowiedź jest jednoznacznie przecząca. To, co zdarzyło się zwłaszcza w ostatnim półwieczu, czyli:

- zastosowanie zaawansowanych technologii sterowania w systemach konwencjonalnych,
 - energoelektronika, umożliwiająca przesyły wysokonapięciowe (HVDC) oraz
 - wprowadzenie źródeł, wykorzystujących zasoby odnawialne w niskonapięciowych systemach dystrybucyjnych
- skłania do ponownego przemyślenia koncepcji systemów stałoprądowych” [2].

Przesyły stałoprądowe w systemach przemiennoprądowych

Aczkolwiek przesyły przemiennoprądowe odniosły znaczący sukces w postaci HVAC, nie oznacza to, że sieci oparte na tej zasadzie są bardziej efektywne niż stałoprądowe przy tych

samych poziomach napięć. Dyskusje o zaletach i wadach obydwu koncepcji nie doprowadziły do jednoznacznych opinii wśród elektryków i nie należy oczekiwać przełomu w tej materii. Jest rzeczą powszechnie znaną, że przy tych samych gabarytach przewodów linia przesyłowa może przenieść większą moc przy prądzie stałym na skutek braku tak ostrych ograniczeń termicznych i – co ważniejsze – stabilnościowych.

Do końca ubiegłego wieku parametry przesyłowe i efektywnościowe systemu AC uznano za wystarczające przy wykorzystaniu coraz wyższych napięć dla przesyłów na znaczne odległości.

Ograniczenia i problemy przesyłu przemiennoprądowego były skrzętnie skrywane, a zalety prądu stałego ujawniły się dopiero w wyniku zasadniczego postępu w zakresie energoelektroniki. Pierwsze w skali światowej komercyjne zastosowanie HVDC (*Gotland 1*) nastąpiło w roku 1954. Linia o napięciu 100 kV wykorzystująca statyczne ręciovne prostowniki łukowe miała zdolność przesyłową 20 MW na odległość 98 km (od *Västernavik* w lądowej części Szwecji do *Ygne* na wyspie *Gotland*), lecz wykazała możliwości DC w całkowicie zdominowanym dotychczas przez AC obszarze przesyłu. Penetrację prądu stałego umożliwiło podniesienie napięcia od ± 100 kV do ± 800 kV, a zdolność przesyłu znacznych wartości mocy stała się ceną zaletą przy lepszym sterowaniu rozpyłów, zwłaszcza w warunkach przejściowych i awaryjnych, często prowadzących do blackoutu. Jak wynika z informacji Podkomitetu Prądu Stałego i Elastycznych Systemów Prądu Przemianowego (DC&FACTS) IEEE w skali świata zrealizowano lub realizuje się przeszło 130 projektów HVDC.

W tabeli 1 przedstawiono daty „kamieni milowych” rozwiązań niosących istotny postęp i ich parametry techniczne. Mimo iż zrealizowane technologie HVDC nie naruszają jeszcze dominującej pozycji technologii przemiennoprądowych, to obserwowane dziś przemiany w obszarze sieci dystrybucyjnych nakazują uwzględnienie nowych uwarunkowań, czyniących z sieci stałoprądowych realną alternatywę dla sieci przemiennoprądowych.

Dla porównania: połączenie HVDC *SwePol*, pomiędzy Szwecją i Polską (2000 r.) ma zdolność przesyłową 600 MW, napięcie ± 450 kV i długość 270 km [3].

Wybrane projekty HVDC i ich parametry [2]

Określenie projektu	Rok	Zdolność przesyłowa, MW	Napięcie, kV	Długość, km	Kraj
Gotland 1	1954	20	± 100	96	Szwecja
Gotland 2	1987	260	± 150	103	Szwecja
Hybrid Inter Island Link	1965	600	± 250	609	N.Zelandia
Itaipu	1984	1 575	± 300	785	Brazylia
Wolgograd-Donbas	1962/1965	720	± 400	473	Rosja
Nelson River 1	1973	1 854	± 463	890	Kanada
Pacific Intertie	1985	2 000	± 500	1 362	USA
Pacific Intertie	1986	3 150	± 600	785	Brazylia
Yunnan-Guanddong	2011	5 000	± 800	2 071	Chiny

Tabela 2

Typowe odbiory w przyszłościowych systemach elektroenergetycznych [2]

Obciążenie	AC	DC	AC z przetwornikiem
UPS i zasobniki energii		v	
Procesy elektrochemiczne		v	
Obciążenie energoelektroniką		v	
Elektryczne piece łukowe	v	v	
Przyszłościowe napędy	v	v	v
Ogrzewanie	v	v	v
Kolej	v	v	v
Przyszłościowe źródła światła		v	
Przyszłościowa klimatyzacja			v

Ewolucja strony popytowej systemów przemiennoprądowych

Podczas gdy system prądu przemiennego cechuje się zaletami, wynikającymi z charakterystyk technicznych i ekonomicznych silników oraz transformatorów, to ewolucyjne zmiany typów obciążeń i rozwój generacji rozproszonej i energoelektroniki zwróciły uwagę na możliwości sieci stałoprądowych. Pierwsze systemy elektroenergetyczne budowane były pod kątem zasilnia odbiorów oświetleniowych, ogrzewania i układów napędowych. Zwycięstwo koncepcji prądu przemiennego ułatwiło rozpowszechnienie elektryczności jako nośnika energii i proces ten postępuje w skali globalnej na wielką skalę. Łatwość przejścia AC/DC umożliwiła współpracę odbiorców/wytwórców stałoprądowych z siecią AC mimo wad, nieodłącznych od koncepcji przemiennoprądowej.

W sposób niemal niezauważalny nastąpiła jednak ważna zmiana w systemach AC. Rozwój zaawansowanych środków i metod sterowania oraz technologii energoelektronicznych umożliwił zwiększenie efektywności użytkowania energii elektrycznej oraz elastyczności sterowania tym procesem. Badanie obciążeń we współczesnych systemach elektroenergetycznych prowadzi do wniosku, że odbiory stałoprądowe oraz przemiennoprądowe z przekształtnikami (ACwC) występują w większości systemów AC. Odbiory wyłącznie przemiennoprądowe cechuje stopniowe zanikanie. W istocie odbiorcy klasy RTV oraz sprzętu komputerowego są w większości odbiorcami stałoprądowymi. Nawet sprzęt AGD z silnikami AC coraz częściej przechodzi na napęd silnikami z przekształtnikami, łatwiejszymi w sterowaniu i bardziej efektywnymi. Aczkolwiek inkadescencyjne źródła światła i wypierające je źródła fluorescencyjne nie są wrażliwe na rodzaj zasilania, to kolejne rozwiązanie w postaci źródeł LED

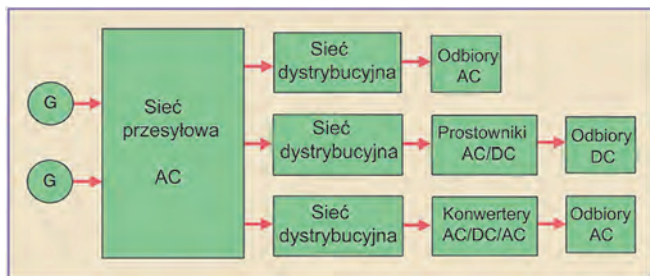
powraca do zasilania prądem stałym. Wiele procesów produkcyjnych w przemyśle (piece łukowe w metalurgii, procesy elektrochemiczne) w wersji stałoprądowej cechuje się wyższą efektywnością wykorzystania energii.

W tabeli 2 zestawiono grupy odbiorców, sugerując wzmocnienie pozycji prądu stałego. Otwarte pozostaje pytanie, czy celowe byłoby przejście na sieć dystrybucyjną stałoprądową.

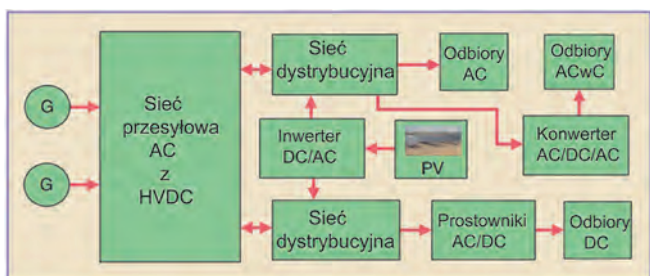
Rozproszone OZE w systemie przemiennoprądowym

Innym ważnym zjawiskiem występującym w sieciach przemiennoprądowych jest pojawienie się generacji rozproszonej i mikrosieci, integrującej źródła, takie jak: turbiny wiatrowe, fotowoltaika, ogniwa paliwowe, zasobniki energii oraz samochody elektryczne. Baterie fotowoltaiczne i ogniwa paliwowe są źródłem prądu stałego, turbiny wiatrowe budowane są w wersjach DC i AC. Źródła stałoprądowe wymagają dla współpracy z AC przetworników. Złożone układy sterowania wymagają również dla każdego inwertera synchronizacji z systemem 50 lub 60 Hz dla eliminacji niepożądanych harmonicznych. Zasobniki akumulatorowe energii wymagają zastosowania sterownika ładowanie/rozładowanie dla połączenia z siecią AC. Stopień penetracji rynkowej samochodów elektrycznych pozwala aktualnie na ich traktowanie wyłącznie jako obciążenia, ponieważ jednak samochód taki może pełnić funkcję zasobnika energii, a jego perspektywiczną rolą może być wygładzanie przebiegu zapotrzebowania, zatem konieczny będzie sterownik rozładowania przy połączeniu z siecią. Integracja źródeł rozproszonych zmienia nie tylko strukturę systemu przemiennoprądowego, ale też zmienia przepływ mocy w dwukierunkowy.

Rysunki 1 i 2 przedstawiają schematycznie konfiguracje i przepływy mocy w systemach AC i DC w wersji bez generacji rozproszonej i HVDC oraz z tymi elementami.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu przemiennoprądowego bez generacji rozproszonej i HVDC (Źródło: IEEE P&EMag)



Rys. 2. Schemat blokowy systemu przemiennoprądowego z generacją rozproszoną i HVDC (Źródło: IEEE P&EMag)

Konwersje prądów w systemach AC i DC

Czy warto wysiłku jest przekształcenie systemów dystrybucyjnych AC w bardziej efektywne struktury, łączące AC i DC? Konieczne jest staranne rozważenie skutków wielokrotnego przekształcenia AC/DC/AC...

Mapa drogowa konwersji w systemach przemiennoprądowych. W systemach AC z udziałem generacji rozproszonej wygenerowany prąd stały musi być przekształcony z wykorzystaniem przekształtników DC/AC. Jeżeli energia wytwarzana jest końcowo zużywana przez odbiory AC, to nie jest potrzebna dalsza konwersja. Dla odbiorców DC mapa przepływów obejmuje przetwarzanie DC/AC i potrzebny jest odpowiedni przetwornik. Dla obciążenia DC sekwencją jest DC/AC/DC i wymagany jest zarówno przetwornik jak i prostownik. Dla obciążeń AC z konwerterem obowiązuje sekwencja DC/AC/DC/AC i niezbędny jest ciąg: przetwornik DC/AC, przetwornik AC/DC oraz przetwornik DC/AC.

Aktualna mapa drogowa w systemach DC. Sieci stałoprądowe przeżywają ostatnio renesans za sprawą rozwoju i rozpowszechnienia odnawialnych źródeł DC oraz właściwych im zalet przy stałoprądowym zasilaniu w sektorach komunalnym, przemysłowym i usługowym. W systemach DC moc stałoprądowa musi być przetworzona z wykorzystaniem przetwornika AC/DC. Jeżeli moc dostarczona przez źródła DC jest końcowo wykorzystywana przez odbiory stałoprądowe, nie jest potrzebne jej przetwarzanie. Zarówno dla obciążeń przemiennoprądowych jak i AC z przetwornikiem (ACwC) sekwencją jest przetwarzanie DC/AC i konieczne staje się zastosowanie przetwornika. Jeżeli moc źródła AC jest wykorzystywana końcowo przez odbiory DC, to sekwencją jest AC/DC i konieczny jest przetwornik AC/DC. Dla

prądu przemiennego AC z przetwornikiem (ACwC) sekwencją jest AC/DC/AC i konieczne są dwa przetworniki AC/DC i DC/AC.

Tabela 3 przedstawia „mapy drogowe” przetwarzania dla systemów AC i DC.

Ogólnie systemy dystrybucyjne AC wymagają dłuższego czasu przetwarzania niż systemy DC. Należy zauważyć, iż z przytoczonej tabeli wynika, że ciąg konwersji jest krótki (lub nawet nie istnieje), jeżeli źródła i obciążenia AC są podłączone do sieci AC, a źródła i obciążenia stałoprądowe powiązane są z siecią stałoprądową. W takich przypadkach zbędne jest wyposażenie przetwarzające i nie występują związane z nim koszty.

Tabela 3

Mapa drogowa konwersji dla systemów AC i DC [2]

System	Źródło	Obciążenie DC	Obciążenie AC	Obciążenie ACwC
AC	DC	DC/AC/DC	DC/AC	DC/AC/DC/AC
	AC	AC/DC	-	AC/DC/AC
DC	DC	-	DC/AC	DC/AC
	AC	AC/DC	AC/DC/AC	AC/DC/AC

Hybrydowe struktury AC/DC dla przyszłościowych systemów elektroenergetycznych

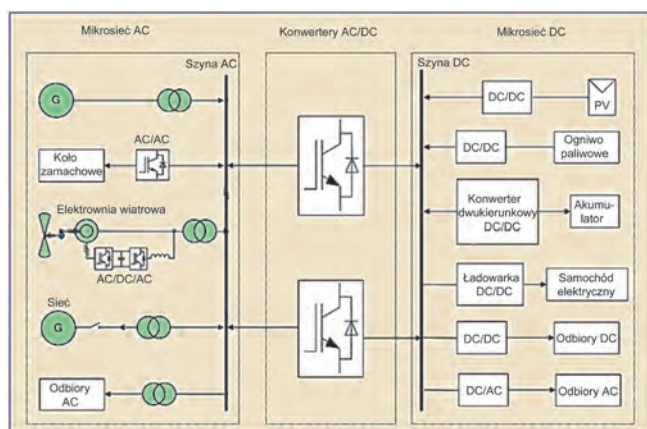
Dla systemów przemiennoprądowych o stuletniej tradycji jest rzeczą naturalną wykorzystywanie różnorodnych przetworników, wbudowanych w różne odbiorniki elektryczne, umożliwiające kompatybilność parametrów. Elektrycy nigdy nie wątpili w racjonalność takich rozwiązań, lecz rzadko rozważali ich efektywność. Ostatnio problemy globalnego ocieplenia i ograniczone zasoby paliw kopalnych sprawiły, że konieczne stało się zwrócenie baczniejszej uwagi na zasoby odnawialne i sprawność wykorzystywania energii. Nastąpił czas na ponowne przemyślenie struktury systemu przemiennoprądowego i jego efektywności.

W tabeli 3 pokazano stosowanie mnogich sposobów przetwarzania dla indywidualnych systemów AC i DC oraz współpracujących z nimi odbiorców. Czy możliwe jest jednak wyeliminowanie wyposażenia dodatkowego lub przynajmniej zredukowanie ogniw łańcucha konwersji? Czy możliwe jest zbudowanie hybrydowego systemu AC/DC z linkami AC i DC, wykorzystując istniejącą infrastrukturę AC? Korzystnym rozwiązaniem jest zbudowanie hybrydowych struktur sieci AC i DC na poziomie dystrybucji w celu sprzęgnięcia źródeł stałoprądowych z odbiorcami przemiennoprądowymi oraz obciążeń stałoprądowych i źródeł przemiennoprądowych z odbiorcami przemiennoprądowymi.

Case study: sieć hybrydowa AC/DC typu 1

Przykład sieci hybrydowej AC/DC przedstawiono na rysunku 3. Hybrydowa mikrosieć AC/DC połączona jest z siecią spółki dystrybucyjnej. Występują tu fragmenty sieci rozdzielczej DC i AC, połączone poprzez konwertery trójfazowe z wykorzystaniem transformatora lub w wersji beztransformatorowej. Źródła stałoprądowe w rodzaju paneli fotowoltaicznych i ogniw paliwowych są połączone do sieci stałoprądowej przez podwyższające przetworniki DC/DC. Obciążenie stałoprądowe, takie jak samochody elektryczne lub diody (LED) są związane z systemem DC poprzez przetworniki

DC/DC. Odbiory AC z silnikami o regularnych obrotach są podłączone do sieci DC poprzez konwertery DC/AC. Zasobniki energii, takie jak akumulatory i superkondensatory, są połączone z siecią DC poprzez dwukierunkowe przetworniki DC/DC. Trójfazowa hybrydowa sieć AC, która może być także istniejącą siecią dystrybucyjną niskiego napięcia, jest połączona z siecią przedsiębiorstwa energetycznego poprzez transformator. Źródła przemiennoprądowe (np. turbiny wiatrowe i napędzane niewielkimi silnikami wysokoprężnymi) współpracują z siecią AC przez transformatory. Zasobniki energii (np. koła zamachowe) są połączone z siecią AC przez przetworniki AC/AC i transformatory. Odbiory AC, w rodzaju silników AC i grzejników, są połączone z siecią AC. Napięcie sieci AC wynosi 200 lub 400 V, lecz nadal brak standardów napięcia dla sieci DC; obecnie w sieciach testowych stosuje się napięcia w zakresie od 12 do 1000 V w zależności od wymagań parametrów przetwornika i systemu. Taka struktura hybrydowa redukuje wielkość konwersji do niezbędnego minimum.



Rys. 3. System z hybrydową mikro siecią AC/DC
(Źródło IEEE P&EMag)

Podstawowe zalety sieci hybrydowych AC/DC

Z przeprowadzonych analiz dla różnorodnych hybrydowych struktur AC/DC wynika, iż możliwe jest zminimalizowanie liczby konwersji poprzez wykorzystanie zarówno połączeń stałoprądowych i przemiennoprądowych w sieci. Zalety takich struktur hybrydowych można uogólnić następująco:

- możliwa jest eliminacja zbędnych procesów wielokrotnego przetwarzania, co skutkuje ograniczeniem całkowitych strat konwersji,
- eliminacja prostowników dla odbiorów DC i ACwC oznacza uproszczenie wyposażenia i ograniczenie elementów energoelektroniki,
- połączenie wszystkich odbiorców DC do stałoprądowej strony sieci hybrydowej ułatwia kontrolowanie harmonicznych, przenikających do strony AC poprzez przetworniki sieciowe, co zapewnia pożądaną jakość napięcia przemiennoprądowego w sieci przedsiębiorstwa energetycznego,
- sieć DC może rozwiązać problemy prądów kolejności zerowej i ujemnej, generowanych przez niesymetrię obciążeń w systemach dystrybucyjnych, co umożliwia eliminację przewodu neutralnego i ograniczenie związanych z tym strat przesyłowych.

Problemy do rozwiązania przed implementacją

Aczkolwiek hybrydyzacja może ograniczać procesy konwersji DC/AC oraz AC/DC w porównaniu z rozwiązaniami indywidualnymi w sieci DC i AC, to nadal występują liczne problemy praktycznej implementacji tych rozwiązań. Jest nieekonomiczne i także trudne budowanie nowej sieci dla zastąpienia istniejącej infrastruktury. Potrzeba czasu, by znaleźć najwłaściwszą ścieżkę dla modernizacji istniejących systemów dystrybucyjnych prądu przemiennego.

Innym problemem jest zdefiniowanie standardowych napięć w sieci DC w sposób zapewniający łatwość połączeń typowanych odbiorców DC z bieżącymi wartościami napięciowymi AC. Poza infrastrukturami hybrydowymi konieczne jest również przekonstruowanie typowych sprzętów AGD i sprzętu biurowego z wbudowanymi układami AC/DC. Jest to zatem proces długotrwałego wprowadzania hybryd sieciowych AC/DC; takie hybrydy łatwo wprowadzić przy wyposażaniu nowych budynków. Dla budynków starych występuje konieczność modernizacji sieci rozdzielczych dla integracji źródeł fotowoltaicznych, nowych systemów oświetlenia (LED) oraz systemów ładowania samochodów elektrycznych i są to okoliczności sprzyjające wprowadzeniu sieci hybrydowych. Systemy przeciwporażeniowe również wymagają stosowania sieci hybrydowych.

Wnioski

Od przeszło stulecia systemy prądu przemiennego rozwinęły się i powiększały swój zasięg aż do dzisiejszych rozmiarów, zapewniając niezbędną energię i wygodę użytkownika w procesie szybkiej ekspansji nowoczesnych społeczeństw. Elektrycy opanowali sztukę projektowania układów przetwornikowych dla różnych źródeł i odbiorców w celu ich współpracy z systemem prądu przemiennego. Problemy, które pojawiły się wraz z globalnym ociepleniem i świadomością ograniczoności zasobów paliw kopalnych, wymagają jednak przemysłów w obszarze efektywności wykorzystywania energii elektrycznej w konwencjonalnych sieciach przemiennoprądowych i nowego podejścia do istniejących struktur przesyłu i dystrybucji. Aczkolwiek nie jest łatwe wprowadzenie nowych rozwiązań do zdominowanych przez koncepcję przemiennoprądową systemów dystrybucyjnych, to przyszłością wysokoefektywnych systemów dostaw energii są hybrydowe sieci AC/DC oraz DC/AC. Te obydwa systemy mogą współpracować harmonijnie dzięki zaawansowanym technikom energoelektroniki, umożliwiającym dostarczanie bardziej zielonej i wysokiej jakości energii przy najwyższej efektywności procesów.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Malko J.: Wojna prądów – początek drugiego starcia. *Zielona Planeta* 2012, nr 6 (105).
- [2] Wang P., Goel L., Liu X., Hoong Choo F.: Harmonizing AC and DC. *IEEE Power & Energy Mag.* 2013, Vol. 11, Nr 3.
- [3] Kamrat W.: Stacja elektroenergetyczna Słupsk – Wierzbicino jako element łączący układ przesyłowy prądu stałego Szwecja-Polska. *Energetyka* 2001, nr 10.

