

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4-9. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Inteligentny transformator dystrybucyjny SN/nn dla sieci Smart Grid o aktywnym udziale prosumentów

Autor

Marek Adamowicz

Słowa kluczowe

inteligentne sieci energetyczne, transformator dystrybucyjny, energoelektronika

Streszczenie

Wraz z rozwojem sieci dystrybucyjnych i ich stopniowym przekształcaniem w inteligentne sieci typu Smart Grid będzie rosło znaczenie i udział sterowanych układów przekształtnikowych mocy stosowanych jako interfejsy pomiędzy źródłami energii a siecią oraz pomiędzy siecią a odbiorcami. W artykule rozwinięto koncepcję wymiany konwencjonalnych transformatorów dystrybucyjnych 50 Hz na inteligentne transformatory dystrybucyjne. Zaproponowano rozwiązanie trójstopniowego inteligentnego transformatora dystrybucyjnego o budowie modułowej, zorientowanego na przyłączanie prosumentów jako aktywnych odbiorców energii o podwyższonych wymaganiach oraz właścicieli małych układów odnawialnych źródeł energii (OZE). Dwa stopnie aktywne: AC-DC po stronie SN oraz DC-AC po stronie nn zapewniają możliwość kompensacji mocy biernej i kształtowania parametrów napięcia. Przedstawione wyniki symulacji potwierdzają, że stopień pośredni transformatora inteligentnego, dzięki zastosowaniu izolowanych przetwornic DC-DC z szybkimi przyrządami półprzewodnikowymi, zapewnia możliwość szybkiej regulacji przepływu mocy pomiędzy stroną pierwotną i wtórną.

1. Wstęp

W ciągu najbliższych lat sieci dystrybucyjne będą podlegały modernizacji, aby poprawić niezawodność i efektywność dostaw energii oraz umożliwić odbiorcom większe zaangażowanie w jej wytwarzanie i bardziej efektywne wykorzystywanie. Jednym z najważniejszych w tym zakresie celów polityki Unii Europejskiej do 2020 roku jest przekształcenie istniejących sieci dystrybucyjnych w sieci inteligentne (z ang. *Smart Grid*) [1, 2] integrujące zachowania i działania wszystkich przyłączonych do nich użytkowników. Wśród wiążących się z tym długofalowych wyzwań można wymienić zwłaszcza: lokalne zarządzanie energią, pełną integrację sieci typu Smart Grid ze źródłami generacji rozproszonej, integrację z odnawialnymi źródłami energii (OZE) i centralnymi elektrowniami oraz zintensyfikowanie generacji rozproszonej podłączonej blisko odbiorców końcowych. Konieczność wdrażania nowych technologii w sieciach dystrybucyjnych wiąże się nie tylko z postępującym wzrostem liczby i mocy przyłączanych jednostek OZE, ale także z przewidywanym, stopniowym zwiększaniem liczby stacji ładowania samochodów elektrycznych. W tym ostatnim przypadku na uwagę zasługują zwłaszcza propozycje wielostanowiskowych stacji szybkiego ładowania pojazdów, które ze względu na dużą pobieraną moc mogłyby być przyłączane do sieci średnich napięć (SN).

Dzięki nowym rozwiązaniom legislacyjnym wspierającym rozwój OZE można się spodziewać, że coraz więcej odbiorców energii będzie decydować się na przyjęcie aktywnej postawy prosumentów, produkujących energię w małych przydomowych elektrowniach. Spodziewany jest również wzrost liczby układów OZE zintegrowanych z inteligentnymi budynkami. Strategie rozwoju sieci dystrybucyjnych, realizowane m.in. w USA [3] i Niemczech [4], zakładają, że prosumenci oprócz udziału

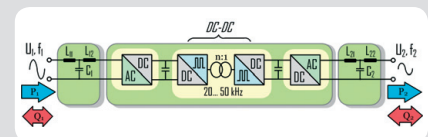
w wytwarzaniu energii będą aktywnie uczestniczyć w procesie zarządzania pikiem obciążenia w systemie, udostępniając magazyny energii w swoich pojazdach elektrycznych, w ramach tzw. infrastruktury *vehicle-to-grid* (V2G). W Danii rozwój infrastruktury V2G jest ściśle powiązany z dalszym rozwojem energetyki wiatrowej, czego przykładem jest zrealizowany na wyspie Bornholm pilotażowy projekt E.D.I.S.O.N. [5, 6]. Projekt E.D.I.S.O.N. ma na celu demonstrację w wydzielonej sieci 10 kV zasilanej z OZE możliwości płynnego współdziałania sektora energetycznego z sektorem transportowym, w ramach infrastruktury V2G o maksymalnym całkowitym piku obciążenia 25 MW. Działania w kierunku przekształcenia sieci dystrybucyjnych w sieci Smart Grid są już obecnie prowadzone także w Polsce, m.in. na Pomorzu [7].

W sieciach Smart Grid układy OZE oraz V2G mogą być nowymi elementami systemu sterowania poziomami napięć i przepływu mocy biernej, co wymaga zmiany technologii stosowanych urządzeń elektroenergetycznych. Z rozwojem sieci Smart Grid będzie rosło znaczenie i udział sterowanych układów przekształtnikowych mocy, stosowanych jako interfejsy pomiędzy źródłami energii a siecią oraz pomiędzy siecią a odbiorcami. Zaawansowane technologicznie urządzenia energoelektroniczne muszą być stosowane m.in. w stacjach szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych oraz w inteligentnych budynkach. Wiąże się to z wieloma nowymi wyzwaniami dla producentów urządzeń energoelektronicznych [8]. Wśród wymienianych w literaturze koncepcji wykorzystania nowoczesnych układów energoelektronicznych w sieciach Smart Grid na szczególną uwagę zasługuje koncepcja wymiany konwencjonalnych transformatorów dystrybucyjnych 50 Hz na inteligentne transformatory dystrybucyjne [9]. Inteligentne transformatory dystrybucyjne SN/nn charakteryzują

się kompaktową, trójstopniową strukturą zawierającą:

- stopień wejściowy w postaci sterowanego przekształtnika energoelektronicznego AC-DC po stronie SN
- stopień pośredni w postaci przekształtnika DC-DC z izolacją realizowaną na wysokiej częstotliwości rzędu 20 kHz... 50 kHz
- stopień wyjściowy w postaci sterowanego przekształtnika DC-AC po stronie nn.

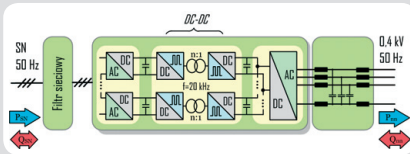
Inteligentny transformator dystrybucyjny o budowie modułowej składa się z określonej, w zależności od wartości napięcia, liczby połączonych szeregowo podstawowych niskonapięciowych modułów funkcjonalnych (ang. *Power Electronics Building Blocks*) [10], które mogą być konstruowane z dostępnych na rynku szybkich przyrządów półprzewodnikowych mocy: tranzystorów i diod o napięciach blokowania 1,2 kV bądź 1,7 kV. Schemat ogólny podstawowego niskonapięciowego modułu funkcjonalnego AC-DC//DC-AC o izolacji galwanicznej strony pierwotnej i wtórnej, umożliwiającego dwukierunkowy przepływ energii i regulację parametrów napięcia, został pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Podstawowy trójstopniowy jednofazowy moduł funkcjonalny AC-DC//DC-AC do zastosowania w połączeniu szeregowym na fazę po stronie SN i równoległym po stronie nn

Innym sposobem budowy transformatora inteligentnego jest łączenie szeregowo po stronie SN i równoległe po stronie nn jednofazowych modułów funkcjonalnych

AC-DC//DC, które pracują na wspólny obwód DC po stronie nn. Wówczas energię po stronie nn przekształca jeden lub kilka połączonych równolegle układów trójfazowych DC-AC o odpowiedniej mocy wyjściowej i systemie połączeń. Na rys. 2 pokazana została koncepcja trójstopniowego układu inteligentnego transformatora dystrybucyjnego, zbudowanego z łączonych szeregowo jednofazowych modułów AC-DC//DC oraz trójfazowego, cztero-przewodowego przekształtnika DC-AC po stronie nn.



Rys. 2. Koncepcja trójstopniowej struktury inteligentnego transformatora dystrybucyjnego o budowie modułowej stopni AC-DC oraz DC-DC i trójfazowym przekształtniku DC-AC po stronie nn

Stopnie aktywne: AC-DC po stronie SN oraz DC-AC po stronie nn zapewniają możliwość kompensacji mocy biernej i kształtowania parametrów napięcia. Dzięki zastosowaniu sterowanych układów przekształtnikowych inteligentny transformator dystrybucyjny może być zatem wykorzystany jako podstawowy element wykonawczy w procesie kontroli i sterowania mocą czynną oraz bierną w systemach rozproszonej generacji, oferując nowe własności i funkcje [11-15], niespotykane dotąd w konwencjonalnych transformatorach dystrybucyjnych SN/nn, jak:

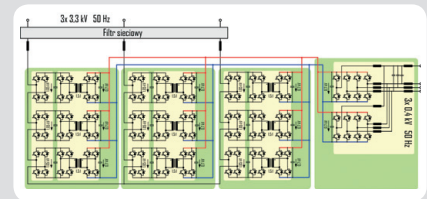
- płynna regulacja parametrów napięcia zasilającego
- zdolność kompensacji mocy biernej
- płynna regulacja przepływu mocy
- balansowanie systemów połączonych
- zwiększona odporność na występowanie wyższych harmonicznych w sieci energetycznej
- zdolność samoregulacji w przypadku przepływu mocy dołączonych źródeł generacji rozproszonej.

Dodatkowo, z wbudowanym magazynem energii w postaci buforu akumulatorowego, inteligentny transformator dystrybucyjny może być bezpośrednio zastosowany np. w układach szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych, przyłączanych do sieci SN [16], umożliwiając płynne zarządzanie zapotrzebowaniem na moc w punkcie ładowania. Częstotliwość pracy przyrządów

półprzewodnikowych w poszczególnych stopniach AC-DC oraz DC-AC transformatora inteligentnego rzędu kHz lub dziesiątek kHz pozwala na zmniejszenie rozmiarów i kosztów pasywnych filtrów sinusoidalnych, wymaganych po stronie SN oraz nn. Podwyższenie częstotliwości pracy tranzystorów i diod stopnia pośredniego DC-DC pozwala z kolei na istotną redukcję rozmiarów obwodów magnetycznych transformatorów użytych do budowy transformatora inteligentnego, w porównaniu z rozmiarami konwencjonalnych transformatorów 50 Hz. Dostępność na rynku przyrządów półprzewodnikowych na napięcia blokowania 1,2 kV bądź 1,7 kV, w tym szybkich diod zwrotnych z węgla krzemu (SiC) [10], pozwala na zmniejszenie strat na przełączanie w poszczególnych modułach i uzyskanie zadowalającej sprawności inteligentnego transformatora dystrybucyjnego. Należy dodać, że szybkie tranzystory i diody, m.in. z nowego materiału półprzewodnikowego węgla krzemu, na wyższe napięcia blokowania rzędu 10 kV [17] i częstotliwości rzędu dziesiątek kHz, są obecnie w fazie prototypów laboratoryjnych. Można się spodziewać, że ich dalszy rozwój w perspektywie 2020 roku umożliwi konstruowanie urządzeń energoelektronicznych dla sieci SN na podobnej zasadzie, jak obecnie są konstruowane przekształtniki energoelektroniczne pracujące w sieciach nn.

W literaturze można znaleźć różne topologie podstawowych modułów funkcjonalnych oraz różne koncepcje ich łączenia w układach inteligentnych transformatorów dystrybucyjnych SN/nn [9-18]. Z technicznego punktu widzenia wdrażanie inteligentnych transformatorów dystrybucyjnych z wykorzystaniem dostępnych obecnie na rynku szybkich diod i tranzystorów jest uzasadnione w sieciach SN o napięciu obniżonym (3÷4 kV), zwłaszcza w wydzielonych instalacjach pilotażowych z udziałem OZE, napędów SN ze zwrotem energii czy stacji ładowania pojazdów. Spektrum zarówno procesów wynikających ze zmiany technologii transformatorów rozdzielczych, jak też spodziewane korzyści są tak szerokie, że ich weryfikacja w najbliższych latach powinna odbywać się w wyodrębnionych systemach o znanych parametrach, umożliwiających jednoznacznie ocenę takich aspektów, jak niezawodność, funkcjonalność i sprawność. Jako przykład można podać zrealizowaną m.in. przez ABB i Arewę na Uniwersytecie Nottingham, w ramach projektu UNIFLEX, instalację pilotażową z inteligentnym transformatorem dystrybucyjnym 3,3 kV/0,41 kV o mocy 300 kVA [18].

Przy wykorzystaniu koncepcji łączenia modułów funkcjonalnych w strukturze transformatora inteligentnego, pokazanej na rys. 2, napięciu obniżonemu do 3÷4 kV odpowiada liczba trzech kaskadowo połączonych modułów przekształtnikowych nn na fazę, co na tym etapie pozwala ocenić funkcjonalność urządzenia, dynamikę regulacji i przydatność dla operatora sieci ze względu na wymogi instrukcji ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej. Dopiero pozytywna ocena funkcjonalności i przydatności wybranych topologii transformatorów inteligentnych w sieciach wydzielonych o obniżonym napięciu uczyni zasadnym umieszczanie pełnowymiarowych urządzeń w sieciach dystrybucyjnych 15 kV.



Rys. 3. Schemat inteligentnego transformatora dystrybucyjnego 3,3 kV/0,4 kV o strukturze trójstopniowej i przekładni transformatorów 1,5:1

2. Model inteligentnego transformatora dystrybucyjnego 3,3 kV/0,4 kV

Na rys. 3 został przedstawiony schemat modelu trójfazowego inteligentnego transformatora dystrybucyjnego 3,3 kV/0,4 kV o mocy znamionowej 180 kVA i trójstopniowej strukturze modułowej. Stopień wejściowy AC-DC po stronie SN tworzy trójfazowy 7-poziomowy falownik napięcia o budowie modułowej, który w każdej fazie składa się z trzech połączonych ze sobą przekształtników mostkowych (mostków tranzystorowych typu H) o mocy 20 kVA. Każdy przekształtnik mostkowy może wygenerować 3-poziomą składową napięcia AC po stronie SN. W czasie pracy inteligentnego transformatora dystrybucyjnego kondensatory obwodów pośredniczących DC poszczególnych przekształtników mostkowych stopnia wejściowego są ładowane do tego samego napięcia, zgodnie z określonym algorytmem regulacji.

Przekształtniki mostkowe AC-DC w każdym module są połączone z pełnomostkowymi sterowanymi izolowanymi przetwornicami DC-DC (ang. DAB – Dual Active Bridge), zapewniającymi dwukierunkowy przepływ energii. Liczbę transformatorów wysokiej częstotliwości trójfazowego

Liczba N modułów na fazę	Liczba poziomów napięcia po stronie SN	Moc pojedynczego modułu po stronie SN	Napięcie DC pojedynczego modułu po stronie SN	Napięcie AC pojedynczego modułu po stronie SN	Napięcie blokowania i prąd* tranzystorów po stronie AC SN	Napięcie DC pojedynczego modułu po stronie nn	Napięcie blokowania i prąd* tranzystorów przetwornicy DC-DC po stronie nn
3	7	20 kVA	1,05 kV	635 V	1,7 kV; 100 A	0,7 kV	1,2 kV; 100 A

* przy założonej przeciętalności modelu 130%

przekształtnika n -poziomowego, utworzonego z połączonych ze sobą kaskadowo mostków H, można określić zależnością $(3(n-1)/2)$. Strony wtórne wszystkich przetwornic DC-DC są połączone ze sobą równolegle, tworząc wspólny obwód pośredniczący DC po stronie niskiego napięcia. Dzięki zastosowanej przekładni transformatorów impulsowych 1,5:1 napięcia blokowania wykorzystanych przyrządów półprzewodnikowych w przetwornicach DC-DC po stronie nn mogą być mniejsze niż po stronie SN. Podstawowe parametry modelu inteligentnego transformatora dystrybucyjnego z rys. 3 zostały przedstawione w tab. 1.

Stopień wyjściowy po stronie nn inteligentnego transformatora dystrybucyjnego z rys. 3, stanowią dwa trójfazowe przekształtniki sieciowe o mocy 90 kVA każdy. Stopień wyjściowy umożliwia zasilanie odbiorców końcowych i prosumentów biorących udział w generowaniu energii zarówno trójfazowych, jak i jednofazowych. W porównaniu z falownikiem 3-gałęziowym z dzielonym kondensatorem DC, zapewniającym również zasilanie 4-przewodowe, falownik 4-gałęziowy zapewnia generowanie dwukrotnie większego napięcia pomiędzy fazą a przewodem neutralnym niż falownik 3-gałęziowy, zapewniając lepsze możliwości kompensacji prądów w przewodzie neutralnym. Zastosowanie dwóch przekształtników DC-AC, połączonych równolegle z jednej strony, pozwala na uzyskanie wymaganej mocy z wykorzystaniem dostępnych na rynku wysoko sprawnych modułów tranzystorowych IGBT 1200 V, 225 A, a z drugiej strony zapewnia redundancję w przypadku uszkodzenia jednego z przekształtników. Dzięki zastosowaniu filtra wyjściowego LCL oraz znanych z literatury metod sterowania predykcyjnego [19] stopień wyjściowy DC-AC transformatora inteligentnego jest w stanie zapewnić wysoką jakość parametrów napięcia AC. Jak zostało pokazane na rys. 3, obydwa trójfazowe 4-gałęziowe przekształtniki DC-AC stopnia wyjściowego mogą wykorzystywać wspólny filtr LCL [20].

Stosowane obecnie metody sterowania trójfazowym czterogałęziowym przekształtnikiem DC-AC [19] potrafią zapewnić elastyczność zasilania odbiorców oraz możliwość generowania niesymetrycznych napięć w poszczególnych fazach, co umożliwia m.in.:

- symetryzację prądów stopnia wyjściowego DC-AC
- korekcję niesymetrii napięcia po stronie nn
- regulację składowej zgodnej napięcia AC bez korekcji niesymetrii
- eliminację składowej przeciwnej napięcia AC, wynikającej z zapadu napięcia.

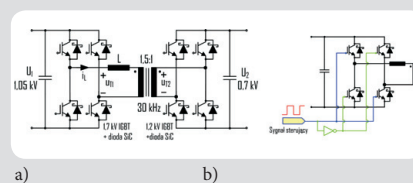
Nowoczesne trójfazowe 4-gałęziowe przekształtniki sieciowe DC-AC są w stanie w elastyczny sposób radzić sobie z większością problemów związanych z niesymetrią napięć i prądów. Dotychczas właściwości przekształtników 4-gałęziowych nie były w pełni wykorzystywane w układach generacji rozproszonej i OZE w sposób, w jaki może to być osiągnięte w inteligentnym transformatorze dystrybucyjnym.

3. Analiza przetwornicy DC-DC z izolacją na wysokiej częstotliwości

Przetwornica DC-DC, zawierająca dwa mostki przekształtnikowe oraz transformator wysokiej częstotliwości, stanowi kluczowy element inteligentnego transformatora dystrybucyjnego, zapewniając izolację galwaniczną oraz umożliwiając transformację napięcia i sterowanie dwukierunkowym przepływem energii. Jedną z korzyści zastosowania wysokiej częstotliwości do transformacji napięcia jest możliwość istotnego zmniejszenia gabarytu transformatora, dzięki wykorzystaniu do jego budowy nowoczesnych materiałów magnetycznych, m.in. rdzeni amorficznych czy nanokrystalicznych o odpowiednio wysokiej indukcji magnetycznej.

Z zastosowaniem nowoczesnych rdzeni magnetycznych wiąże się zwiększenie częstotliwości przełączeń tranzystorów, w stopniu izolacyjnym transformatora inteligentnego przesuwając ciężar jego projektowania w kierunku uzyskania jak najmniejszych strat na przełączanie w przyrządach półprzewodnikowych przetwornicy DC-DC. Dostępne na rynku diody półprzewodnikowe z nowego materiału węgla krzemu (SiC), o napięciach blokowania 1,2 kV oraz 1,7 kV, charakteryzują się kilkudziesięciokrotnie mniejszym ładunkiem przejściowym podczas przełączania niż ultraszybkie diody krzemowe. Ich wykorzystanie oraz zastosowanie nowoczesnych metod tzw. miękkiego przełączania tranzystorów (ang. ZVS – zero voltage switching) pozwala uzyskać sprawność izolowanych przetwornic DC-DC powyżej 95%.

Schemat sterowanej przetwornicy izolowanej DC-DC z tranzystorami IGBT 1,7 kV po stronie SN i tranzystorami IGBT 1,2 kV po stronie nn został pokazany na rys. 4.



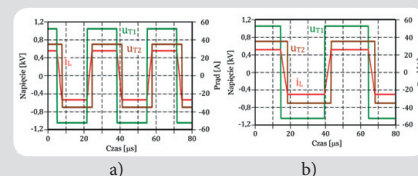
Rys. 4. Sterowana przetwornica izolowana DC-DC z tranzystorami IGBT i diodami zwrotnymi z węgla krzemu (SiC) (a); sposób rozdzielania sygnału sterującego tranzystorami mostka (b)

Zadaniem dwóch mostków przekształtnikowych przetwornicy DC-DC (rys. 4a) jest modulacja napięcia po obu stronach transformatora wysokiej częstotliwości. Metoda sterowania izolowaną pełnomostkową przetwornicą DC-DC polega na odpowiednim przesuwaniu względem siebie, w czasie prostokątnych sygnałów sterujących (rys. 4b), tranzystorami mostków przekształtnikowych po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora. W najprostszej metodzie sterowania, wystarczającej w określonym zakresie do sterowania mocą przesyłaną pomiędzy mostkami przekształtnikowymi, oba sygnały sterujące mają jednakowy współczynnik wypełnienia $D = 0,5$. Wartość przesyłanej mocy P jest regulowana za pomocą regulacji kąta

przesunięcia fazowego ϕ sygnału sterującego strony wtórnej, względem sygnału sterującego tranzystorami mostka strony pierwotnej, zgodnie ze wzorem:

$$P = \frac{U_1 \cdot (U_2 / n) \cdot \phi \cdot (\pi - \phi)}{2 \cdot \pi^2 \cdot f_s \cdot L} \quad (1)$$

gdzie: U_1, U_2 – oznaczają napięcia po stronie DC mostków strony pierwotnej i wtórnej, L – oznacza szeregowo dołączoną indukcyjność w celu magazynowania energii i ograniczania stromości zmian prądu w obwodzie transformatora, a f_s – częstotliwość przełączania tranzystorów przetwornicy. Na rys. 5 przedstawiono wyniki symulacji analizowanej przetwornicy, z wykorzystaniem metody przesuwania prostokątnych sygnałów sterujących o współczynniku wypełnienia $d = 0,5$.

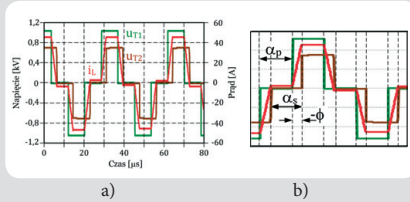


Rys. 5. Przebiegi symulacyjne napięć u_{T1}, u_{T2} oraz prądu strony pierwotnej i_{T1} przy $U_1 = 1,05$ kV, $U_2 = 0,7$ kV oraz mocy $P = 20$ kW dla przypadku (a): $f_s = 30$ kHz, $L = 100$ μ H oraz przypadku (b): $f_s = 20$ kHz, $L = 150$ μ H, w układzie otwartym dla tego samego przesunięcia fazowego $\phi \approx \frac{\pi}{6}$

Wartość mocy przesyłanej pomiędzy mostkami przetwornicy zależy nieliniowo od przesunięcia fazowego ϕ sygnałów sterujących. Przy dużych wartościach ϕ dalsze zmiany kąta przesunięcia fazowego powodują niewielkie zmiany mocy czynnej na wyjściu przetwornicy DC-DC, natomiast istotnie zwiększają moc wymianianą wewnątrz pomiędzy kondensatorami DC strony pierwotnej oraz wtórnej w obwodzie transformatora i dławika L , zwiększając tym samym amplitudę prądu i_L . Maksymalna wartość przesyłanej mocy jest ograniczona wartością indukcyjności L oraz częstotliwością f przełączeń tranzystorów. Krok regulacji, czyli najmniejsza wartość zmian kąta fazowego w układzie sterowania cyfrowego, zależy od częstotliwości zegara procesora sterującego i kroku wykonywania programu sterowania. Szybkość regulacji mocy zależy od aktualnej wartości kąta przesunięcia fazowego ϕ . Bardzo szybka regulacja dwukierunkowego przepływu energii może odbywać się przy małych obciążeniach. Bardziej zaawansowane metody sterowania izolowaną przetwornicą DC-DC umożliwiają regulację przepływu mocy, beznapięciowe przełączanie tranzystorów (ZVS) w szerokim zakresie oraz pracę przy mniejszych wartościach indukcyjności szeregowej L w obwodzie transformatora dzięki zastosowaniu – oprócz przesuwania sygnałów sterujących względem siebie – również niezależnej regulacji współczynników wypełnienia D_1 oraz D_2 sygnałów sterujących tranzystorami obu mostków przetwornicy DC-DC [21]. Przebiegi symulacyjne

z zastosowaniem metody podwójnej modulacji szerokości impulsów sygnałów sterujących (ang. *Dual PWM*) zostały pokazane na rys. 6.

Można wyróżnić cztery tryby sterowania przetwornicą izolowaną z podwójną modu-

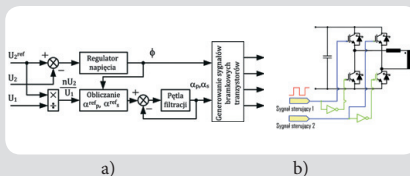


Rys. 6. Przebiegi symulacyjne napięć u_{T1} , u_{T2} oraz prądu strony pierwotnej i_1 przy $U_1 = 1,05$ kV, $U_2 = 0,7$ kV, mocy $P = 20$ kW, $f_s = 30$ kHz oraz indukcyjności szeregowej $L = 50$ μ H (a); kąt przesunięcia fazowego ϕ oraz kąty α_p , α_s modulacji sygnałów sterujących strony pierwotnej i wtórnej

lacją sygnałów sterujących [21]. Kąty modulacji α_p sygnału sterującego strony pierwotnej oraz α_s sygnału strony wtórnej mogą być sobie równe lub nastawiane niezależnie. Dla trybu sterowania, którego przebiegi pokazano na rys. 6, zachodzi [21]:

$$\frac{|\alpha_p - \alpha_s|}{2} < \phi < \min\left(\frac{\alpha_p + \alpha_s}{2}, \pi - \frac{\alpha_p + \alpha_s}{2}\right) \quad (2)$$

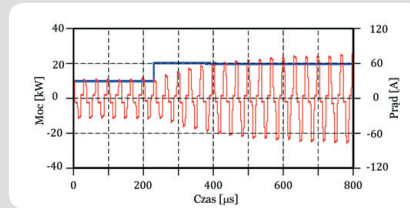
Układ sterowania izolowaną przetwornicą DC-DC z podwójną modulacją szerokości impulsów sygnałów sterujących został pokazany na rys. 7.



Rys. 7. Układ sterowania izolowaną przetwornicą DC-DC z podwójną modulacją szerokości impulsów [21] (a); sposób rozdzielenia sygnałów sterujących mostka strony pierwotnej (b)

Na rys. 8 przedstawiono wyniki symulacji stanu przejściowego prądu strony wtórnej transformatora, po skokowej zmianie mocy przetwornicy DC-DC z 10 kW na 20 kW przy zastosowaniu sterowania z podwójną modulacją.

Jak można zauważyć na rys. 8, przy wartości indukcyjności szeregowej $L = 50$ μ H, czas trwania stanu przejściowego przy zmianie obciążenia z 50% do wartości znamionowej mocy wynosi ok. 300 μ s. Amplituda prądu po stronie wtórnej transformatora przy obciążeniu znamionowym równa 75 A wynika z przekładni transformatora 1,5:1.



Rys. 8. Stan przejściowy po zmianie mocy przetwornicy DC-DC z 10 kW do 20 kW: przebiegi prądu po stronie wtórnej transformatora oraz mocy wyjściowej przetwornicy

4. Podsumowanie

Przedstawione w artykule rozwiązanie trójstopniowego inteligentnego transformatora dystrybucyjnego o budowie modułowej jest zorientowane na przyłączanie prosumentów jako aktywnych odbiorców energii o podwyższonych wymaganiach oraz właścicieli małych układów OZE oraz źródeł generacji rozproszonej, dając możliwość przyłączania na zasadzie *plug&play*, znanej dotychczas z technologii komputerowej. Stopień pośredni transformatora inteligentnego, dzięki zastosowaniu izolowanych przetwornic DC-DC z szybkimi przyrządami półprzewodnikowymi, zapewnia możliwość szybkiej regulacji przepływu mocy pomiędzy stroną pierwotną i wtórną. W ramach grantu badawczego pt. „Inteligentny transformator dystrybucyjny SN/nn dla sieci Smart Grid o aktywnym udziale prosumentów”, prowadzonego przez autora na Politechnice Gdańskiej w Katedrze Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć i finansowanego przez Grupę ENERGA SA, obecnie jest przeprowadzana analiza teoretyczna, badania symulacyjne oraz badania laboratoryjne modelu modułu przekształtnikowego AC-DC//DC-AC, stanowiącego podstawowy moduł funkcjonalny proponowanego inteligentnego transformatora dystrybucyjnego nowej generacji. Dodatkowo, w ramach projektu, opracowane zostaną metody komunikacji pomiędzy modułami oraz układem sterowania nadrzędnego i interfejsem użytkownika.

Bibliografia

- Jiyuan F., Borlase S., The evolution of distribution, *IEEE Power and Energy Magazine* 2009, Vol. 7, No. 2, s. 63–68.
- Ipakchi A., Albuyeh F., Grid of the future, *IEEE Power and Energy Magazine* 2009, Vol. 7, No. 2, s. 52–62.
- California Utility Vision And Roadmap For The Smart Grid Of 2020, EPRI Electric Power Research Institute, Final project report, [on line]: <http://www.energy.ca.gov/2011publications/CEC-500-2011-034/CEC-500-2011-034.pdf>.
- The German Roadmap. E-Energy / Smart Grid. German Commission for Electrical, Electronic & Information Technologies of DIN and VDE.
- EDISON Project Report, [on line]: <http://www.edison-net.dk/Dissemination/Reports.aspx>.
- Xu Z. i in., Towards a Danish Power System with 50% Wind – Smart Grids Activities in Denmark, Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, s. 1–8.
- Czyżewski R., Babś A., Madajewski K., Sieci inteligentne – wybrane cele i kierunki działania operatora systemu dystrybucyjnego, *Acta Energetica* 2012, nr 8, s. 31–35.
- Adamowicz M. i in., Sterowanie rozdzielaniem energii w układach przekształtnikowych pojazdów elektrycznych i źródeł odnawialnych, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 2012, nr 4b, s. 7–12.
- Wang J. i in., Smart Grid Technologies, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, June 2009, s. 16–23.
- Adamowicz M., Krzeński Z., Strzelecki R., Hybrid High-frequency-SiC and Line-frequency-Si based PEBB for MV Modular Power Converters, Proc. IEEE Conf. on Industrial Electronics IECON2012, Montreal, 2012, s. 1–6.
- Wang D. i in., Theory and application of distribution electronic power transformer, *Electric Power System Research* 2009, Vol. 77, s. 219–226.
- Akagi H., Kitada R., Control and Design of a Modular Multilevel Cascade BTB System Using Bidirectional Isolated DC/DC Converters, *IEEE Transactions On Power Electronics* 2009, Vol. 26, No. 9, s. 2457–2464.
- Fan H., Li H., A High-Frequency Medium-Voltage DC-DC Converter for Future Electric Energy Delivery and Management Systems, Proc. 8th IEEE Conf. on Power Electronics – ECCE Asia, 2011, s. 1031–1038.
- Research on Voltage and Power Balance Control for Cascaded Modular Solid-State Transformer, *IEEE Transactions On Power Electronics* 2011, Vol. 26, No. 4, s. 1154–1166.
- Lu X. i in., Talk to Transformers: An Empirical Study of Device Communications for the FREEDM System, Proc. IEEE Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011, s. 303–308.
- Hóimoja H., Vasiladiotis M., Rufer A., Power interfaces and storage selection for an ultrafast EV charging station, Proc. IEEE Conf. on Power Electronics, Machines and Drives, University of Bristol, UK, 27–29 March 2012.
- Das M. K. i in., 10 kV, 120 A SiC Half H-Bridge Power MOSFET Modules Suitable for High Frequency, Medium Voltage Applications, Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ECCE, 2011, s. 2689–2692.
- UNIFLEX PM, Advanced Power Convertors for Universal and Flexible Power Management in Future Electricity Networks, [on line]: <http://www.eee.nott.ac.uk/uniflex/Project.htm>.

19. Rodriguez J. i in., Predictive Current Control of a Three-Phase Four-Leg Inverter, Proc. 14th IEEE Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010, s. 106–110.
20. Wojciechowski D., High Power Grid Interfacing AC-DC PWM Converters with Power Conditioning Capabilities, Proc. IEEE Conf. on Industrial Electronics IECON2012, Montreal, 2012, s. 1–6.
21. Jain A. K., Ayyanar R., PWM Control of Dual Active Bridge: Comprehensive Analysis and Experimental Verification, IEEE Transactions On Power Electronics 2011, Vol. 26, No. 4, s. 1215–1227.

Publikacja pokonkursowa

Artykuł zwyciężył w konkursie na grant badawczy ENERGA SA

Marek Adamowicz

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: madamowi@ely.pg.gda.pl

Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć Politechniki Gdańskiej. Był kierownikiem projektu LIDER, dotyczącego przekształtników AC/AC z przyrządów półprzewodnikowych z węgla krzemu dla elektrowni wiatrowych, w ramach pierwszego programu rozwoju młodej kadry naukowej Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (2010–2012). Zainteresowania naukowe to m.in.: opracowanie nowych układów przekształtnikowych dla sieci dystrybucyjnych SN, metod sterowania elektrowniami wiatrowymi oraz napędami elektrycznymi średniego napięcia o dwukierunkowym przepływie energii.