

WPLYW NIEPEŁNOFAZOWEJ PRACY ENERGOELEKTRONICZNEGO PRZEKSZTAŁNIKA SIECIOWEGO NA SYSTEM ELEKTROENERGETYCZNY

Dariusz ZIELIŃSKI¹, Katarzyna PRZYTUŁA²

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

1. tel.: 570643750; e-mail:shadow031@gmail.com

2. tel.: 605308165; e-mail:poczta.katarzyna@gmail.com

Streszczenie: Artykuł przedstawia wpływ pracy niepełnofazowej na pracę przekształtnika energoelektronicznego. Do badań wykorzystano trójpoziomowy przekształtnik NPC (ang. Neutral Point Clamped), sterowany metodą napięciowo zorientowaną Voltage Oriented Control (VOC). Przekształtnik ten pełni rolę sprzęgu, który integruje odnawialne źródła energii z siecią elektroenergetyczną. Artykuł zawiera omówienie przyczyn pracy niepełnofazowej oraz analizę wpływu awarii przekształtników na fragment sieci elektroenergetycznej. Symulacje przeprowadzono w środowisku MATLAB/Simulink. Badania obejmują również koncepcję zintegrowanego zabezpieczenia dla tranzystorów IGBT, sterowanego w układzie mikroprocesorowym DSP.

Słowa kluczowe: Praca niepełnofazowa, zwarcia, zabezpieczenia kluczy IGBT, VOC

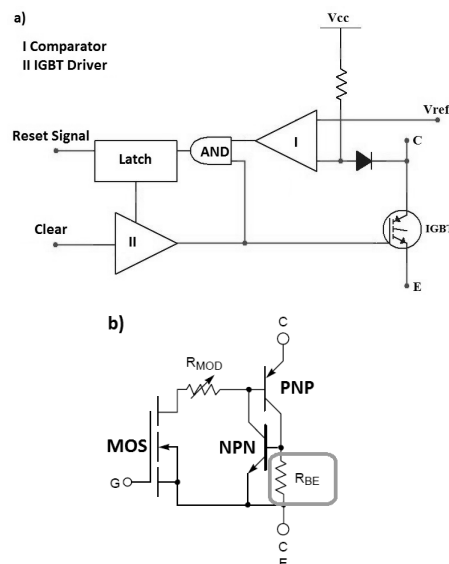
1. WSTĘP

Rozwój energetyki rozproszonej opartej o dużą liczbę źródeł energii odnawialnej wymaga dołączania do sieci coraz większej liczby przekształtników energoelektronicznych. Przekształtniki te pełnią rolę interfejsów pomiędzy parametrycznie niestabilnym źródłem energii odnawialnej a sztywną siecią elektroenergetyczną. Pracy układów przekształtnikowych w takich konfiguracjach towarzyszą przemijające zwarcia lub chwilowe przeciążenia. Te stany zakłócenia nie pozostają bez wpływu na sieć przesyłową, a w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do niestabilności systemu elektroenergetycznego w danym obszarze. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych pracy przekształtnika trójpoziomowego z siecią elektroenergetyczną. Omówiono również przyczyny pracy niepełnofazowej układów energoelektronicznych i skutkach tego zjawiska, występującego w sieci. Artykuł zawiera analizę prądów w modelowym fragmencie sieci elektroenergetycznej. Zaprezentowano stosowane układy elektronicznych zabezpieczeń układów przekształtnikowych dużej mocy oraz wyjaśniono przyczyny awarii tranzystorów IGBT.

2. PRZYCZYNY PRACY NIEPEŁNOFAZOWEJ PRZEKSZTAŁNIKA

Przekształtnik współpracujący z siecią elektroenergetyczną pracuje w stanie zakłócenia wielokrotnie w ciągu roku. Zakłócenia spowodowane są najczęściej czynnikami atmosferycznymi takimi jak burze, szadź katastroficzna na przewodach linii elektroenergetycznej, połamane drzewa. Zakłócenia mogą pochodzić nie tylko od strony linii przesyłowej. Są to przede wszystkim zwarcia w obwodzie generatora elektrowni wiatrowej, awarie paneli fotowoltaicznych,

błędy obsługi lub starzenie się podzespołów bazowych. Z tego powodu buduje się zaawansowane obwody zabezpieczeń, których celem jest ochrona wrażliwych półprzewodników oraz wyeliminowanie możliwości pracy niepełnofazowej.



Rys. 1. a) Schemat blokowy zabezpieczenia IGBT (a); model tranzystora IGBT wykorzystywany w badaniach (b)

Przykładem takiej ochrony jest układ przedstawiony na (rys. 1a). Układ dokonuje pomiaru spadku napięcia na złączu tranzystora kolektor-emiter (V_{CE}) (rys. 1b). W momencie wystąpienia zwarcia następuje gwałtowny wzrost napięcia V_{CE} . To zjawisko spowodowane jest przepływem dużego prądu przez rezystancję wewnętrzną tranzystora R_{BE} [1]. W momencie gdy napięcie przekroczy dopuszczalną wartość referencyjną (V_{ref}) komparator zmienia stan logiczny na przeciwny. Efektem działania jest wyłączenie i zablokowanie sterowania tranzystora IGBT. Ten rodzaj zabezpieczenia jest efektywny tylko w przypadku wystąpienia przeciążenia prądowego klucza i nie chroni urządzenia energoelektronicznego przed innymi typami zakłóceń.

Tabela 1 przedstawia rodzaje przykładowych zaburzeń zewnętrznych występujących w sieci elektroenergetycznej oraz wynikające z nich przyczyny awarii tranzystorów IGBT zastosowanych w modelowym przekształtniku. Każda z wymienionych przyczyn może skutkować pracą niepełnofazową układu i prowadzić do pracy awaryjnej układu.

Na podstawie wyżej wymienionych powodów zostanie opracowany model numeryczny układu zabezpieczającego klucz półprzewodnikowy IGBT, zawierający w swojej strukturze obwody chroniące przed pracą niepełnofazową.

Tablica 1. Przyczyny zaburzeń wewnętrznych

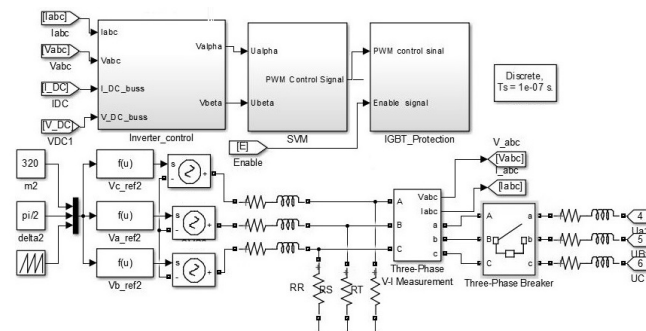
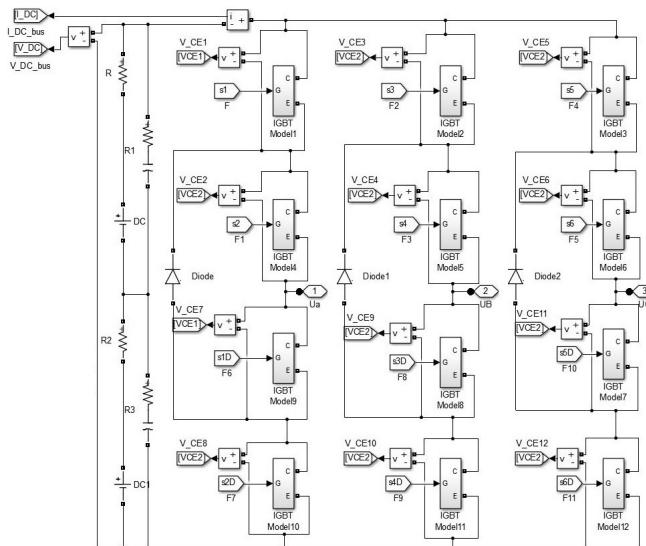
Rodzaj zaburzenia zewnętrznego	Przyczyna awarii tranzystorów IGBT	
zwarcie w gałęzi przekształtnika	zwarcie uszkadza jeden element	
zwarcie szeregowe gałęzi mostka	zakłócenia w obwodzie bramki tranzystora, błąd logiczny, szumy.	
	dv/dt	niewłaściwa polaryzacja wsteczna bramki
	za krótki czas martwy	niewłaściwa polaryzacja wsteczna bramki, błędne nastawy czasu martwego
zwarcie zewnętrzne	przerwa w obwodzie, błędne połączenia przewodów roboczych, zwarcie w obwodzie obciążenia	
zwarcie doziemne	przerwa w obwodzie, błędne połączenia przewodów	
przeciążenie	ochrona przeciążeniowa nastawiona błędnie oraz błędy logiczne	
przekroczenie napięcia szyny DC	przekroczenie napięcia wejściowego oraz niewłaściwa ochrona przepięciowa	
przepięcia	wyłączenie klucza	
	komutacja FDW	wysoka wartość di/dt
		krótkie czasy rekombinacji wstecznej

3. MODEL NUMERYCZNY PRZEKSZTAŁNIKA

Przekształtniki sieciowe powinny generować napięcie o kształcie zbliżonym do sinusoidy, przy jednoczesnej kontroli prądu i współczynnika mocy we wszystkich stanach pracy. Szczególnie trudna sytuacja występuje podczas stanów awaryjnych sieci, do której dołączony jest przekształtnik. Głównym problemem jest niebezpieczeństwo nadmiernego wzrostu prądu w gałęziach przekształtnika, zmiennego obciążenia źródła energii, nierównomiernego obciążenia faz czy pojawienia się zakłóceń częstotliwościowych w obwodzie prądu stałego.

Istnieje szereg metod sterowania, które są stosowane w tego typu układach. Inspiracją do ich opracowania jest sterowanie polowo-zorientowane FOC (ang. *Field Oriented Control*) i sterowanie bezpośredniego DTC (ang. *Direct Torque Control*) maszyn prądu zmiennego. Odpowiednikami powyższych metod są kolejno VOC (ang. *Voltage Oriented Control*) oraz DPC (ang. *Direct Power Control*). Podobnie jak w przypadku sterowania silników pojawiają się one w wielu odmianach optymalizujących własności przekształtników sieci ze względu na stany nieustalone, czy wielkość strat łączeniowych [2].

Na potrzeby badań opracowano przekształtnik trójfazowy NPC (ang. *Neutral Point Clamped*) [3, 4], przedstawiony na rys.2. Układ składa się z dwunastu kluczy półprzewodnikowych – tranzystorów IGBT oraz trzech diod poziomujących. Układ zasilono z dzielonego napięcia stałego 750 V. Jako bufor energii zastosowano kondensator o pojemności 1 mF. Na każdym tranzystorze zainstalowano układ do pomiaru napięcia V_{ce} . Na podstawie tego pomiaru są projektowane układy zabezpieczające klucze tranzystorowe.



Rys. 2. Model przekształtnika NPC przyłączającego źródło prądu stałego do wybranego fragmentu sieci elektroenergetycznej

Algorytm VOC wielokrotnie przebadano w dynamicznych stanach pracy. Parametry nastaw czterech regulatorów PI dobrano opierając się o kryterium Zieglera-Nicholsa, tak by uzyskać jak najszybsze odpowiedzi przy minimalnym przeregulowaniu. Zastosowane regulatory PI wykorzystują system „Anty-Wind Up”, zapewniający minimalizację wspomnianego przeregulowania. Bardzo ważnym elementem sterowania wektorowego VOC jest również system PLL (ang. *Phase Loop Locking*), odpowiadający za poprawną synchronizację przekształtnika z modelową siecią [5]. Algorytm PLL oparto o modyfikowaną metodę SRF (ang. *Synchronous Reference Frame*) [2]. Dobór algorytmu PLL był zrealizowany na podstawie kryterium utrzymania synchronizmu w stanach zaburzeniowych. Synchronizacja jest elementem kluczowym projektowania i jej poprawność ma ogromny wpływ na jakość prezentowanych badań.

4. WYNIKI BADAŃ

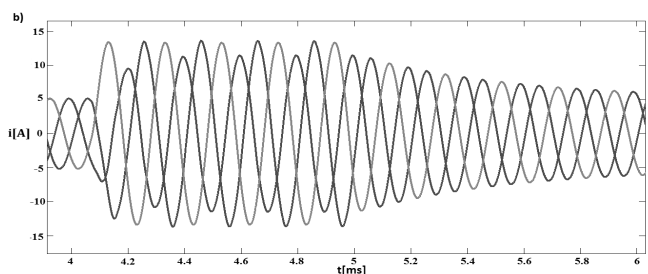
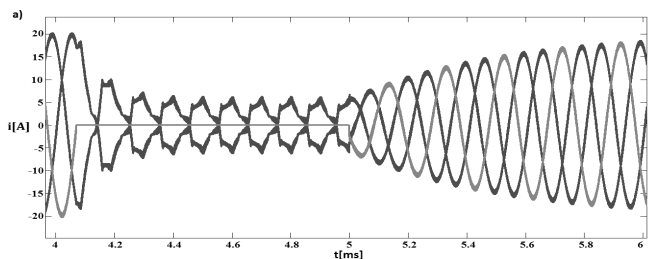
Badania prowadzono na modelu przedstawionym na rys.2. Przeprowadzono serie pomiarów polegających na okresowym wystąpieniu pojedynczego zakłócenia. Zbadano następujące przypadki:

- przerwa w fazie przekształtnika,
- zwarcie pary kluczy półmostka,
- awaria sterowania tranzystora IGBT,
- zwarcie doziemne jednej fazy obciążenia znajdującego się w bliskim sąsiedztwie przekształtnika.

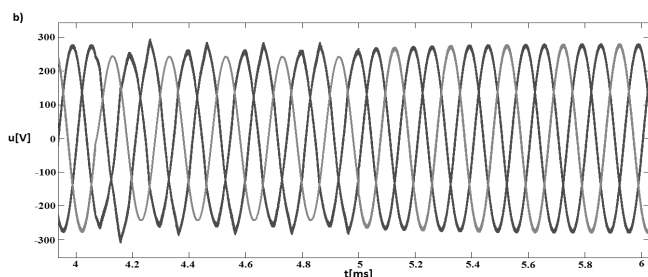
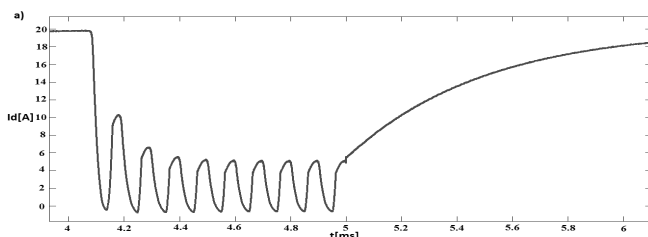
Następnie przedstawiono najważniejsze wyniki symulacyjne w postaci oscylogramów. Awaria miała miejsce w czasie symulacji 0,4 s i trwała 0,1 s. Okresowe wystąpienie awarii

ma na celu wykazanie czy sterowanie jest w stanie powrócić do pracy stanu ustalonego.

Praca niepełnofazowa jest rozumiana jako stan awaryjny podczas, którego napięcie na „chorej” fazie jest bliskie zeru. Ten rodzaj zakłócenia przedstawiono na rys. 3. Przed wystąpieniem zakłócenia przekształtnik pokrywał 75% zapotrzebowania na moc obciążenia. W chwili $t = 0,4$ s przekształtnik znacznie obniżył prąd wydawany do sieci. W przebiegu prądu zaobserwowano wyższe harmoniczne, które nie pozostały bez wpływu na napięcie odbiornika rys. 4b. Układ zabezpieczenia nie ma podstawy do reagowania na takie zaburzenie.



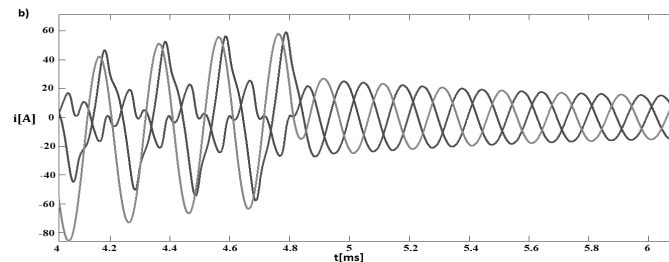
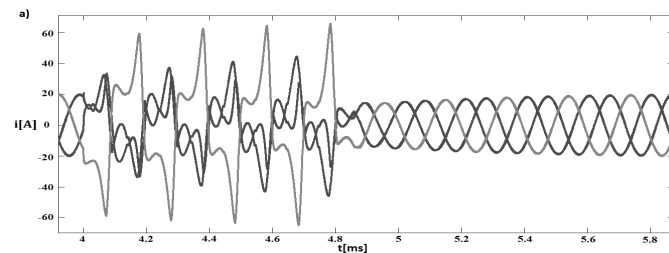
Rys. 3. Przerwa fazy przekształtnika: a) prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika; b) prąd na zaciskach generatora



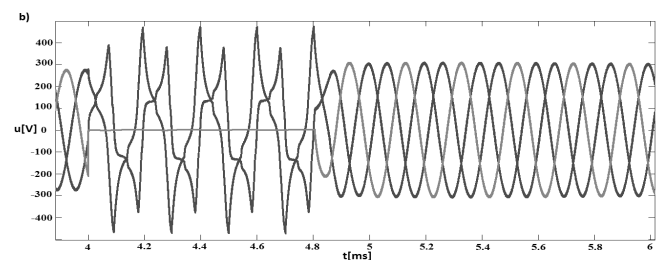
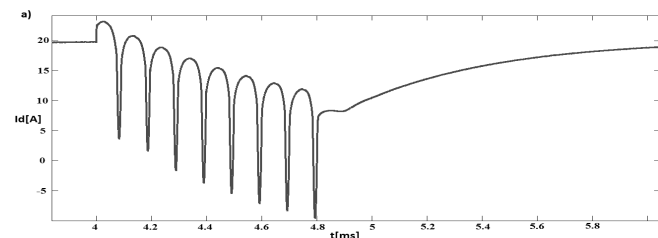
Rys. 4. Przerwa fazy przekształtnika: a) prąd I_d badanego przekształtnika; b) napięcie zmierzone na zaciskach obciążenia

Dokonano zwarcia doziemnego jednej z faz odbiornika pracującego w pobliżu przekształtnika rys. 5. Z powodu zaniku napięcia na jednej fazie, przekształtnik utracił częściowo synchronizację. Świadczy o tym wzrost prądów powyżej wartości zadanej rys. 4a–5a. Przekształtnik utracił sterowalność i jest silnym zagrożeniem dla odbiorników pracujących w sieci. Napięcie na zaciskach odbiornika ulega silnej deformacji, a niewłaściwa praca przekształtnika powoduje niedopuszczalne przekroczenie wartości znamionowej napięcia sieciowego w fazach zdrowych rys. 6b. Sterowanie VOC nie radzi sobie z silnie niezbalansowanym

obciążeniem występującym w bliskim sąsiedztwie przekształtnika. W takich przypadkach zalecane jest bezzwłoczne wyłączenie przekształtnika.



Rys. 5. Zwarcie fazy przekształtnika: a) prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika; b) prąd na zaciskach generatora



Rys. 6. Zwarcie fazy przekształtnika: a) prąd I_d badanego przekształtnika, b) napięcie zmierzone na zaciskach obciążenia

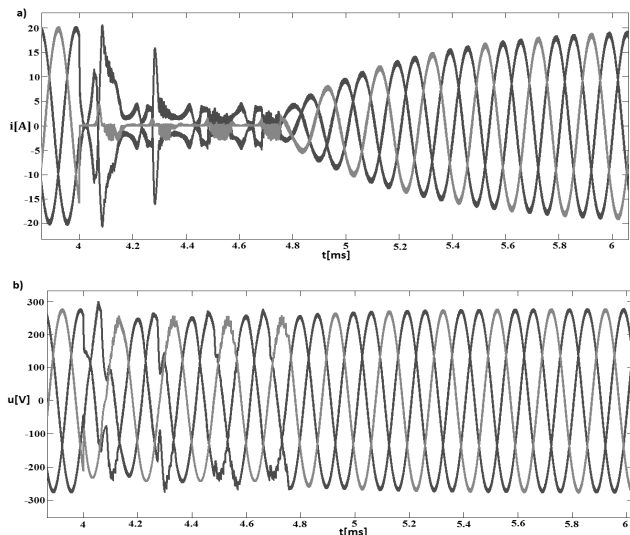
Symulację zwarcia fazy przekształtnika przeprowadzono z zablokowanym zabezpieczeniem. W przypadku prowadzenia badań z działającym zabezpieczeniem następuje wyłączenie przekształtnika już w pierwszym półokresie po wystąpieniu zakłócenia.

Dokonano zwarcia na dolnym półmostku przekształtnika rys. 7. Ten rodzaj zakłócenia jest możliwy do realizacji przy pomocy oprogramowania numerycznego. W każdym cyklu załączenia górnej części półmostka płyną prądy skrośne, których wartość sięga setek amperów. Przyczyną tego zjawiska jest duża pojemność nisko impedancyjnych kondensatorów zainstalowanych na szynie DC. Brak szybkiej reakcji zabezpieczenia, która wyłączy uszkodzony obwód, w czasie nie dłuższym niż 50 ns, spowoduje całkowite zniszczenie półmostka, a nawet wybuch samych elementów półprzewodnikowych.

Wpływ zwartego półmostka na sieć elektroenergetyczną nie jest znaczący. Sprężenie zwrotne kontroli prądu wykrywa przepływ w przeciwną stronę i ogranicza poziom wypełnienia PWM do minimum. Z powodu uszkodzenia

półmostka deformacja napięcia na wyjściu przekształtnika jest znaczna.

Zwarcie wewnętrzne przekształtnika nie jest znacząco groźne dla sieci. W pierwszej chwili wystąpienia awarii prąd zwarciový jest ograniczony przez indukcyjność dławika sprzęgającego. Następnie powinno nastąpić przepalenie wkładek topikowych zainstalowanych na szynie DC przekształtnika lub szybkie wyłączenie starowania pozostałych kluczy w celu uniknięcia zwarcia skrośnego.



Rys. 7. Zwarcie dolnej pary tranzystorów półmostka:
a) prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika; b) wpływ zwarcia na napięcie sieci

5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono badania zachowania się przekształtnika trójpoziomowego podczas pracy w stanach zakłóceńowych i wpływu ich pracy na sieć elektroenergetyczną. Wyjaśniono przyczyny pracy zaburzeniowej przekształtnika oraz przedstawiono wpływ pracy niepełnofazowej na prąd wyjściowy przekształtnika. Zamodelowano również zabezpieczenie wykrywające stan saturacji tranzystora IGBT. Dokonano kontrolowanego wyłączenia pary kluczy mostka. Na podstawie wyników symulacyjnych stwierdzono, że nie jest dopuszczalna przedłużająca się praca przekształtnika w stanie pracy niepełnofazowej. Badany przekształtnik

nie spełnia normy określającej zawartość harmoniczných wprowadzanych do sieci, a w niektórych przypadkach traci sterowalność. Z uwagi na możliwość wystąpienia stanu zwarciový pracy przekształtnika, polegającego na przebicium pary IGBT, przeprowadzono szczegółową symulację tych stanów. Wyniki przedstawiono na rysunkach 3–7. Na podstawie badań symulacyjnych stwierdzono, że wymagana jest szybka reakcja sterowania przekształtnika na stany awaryjne. Zabezpieczenie powinno składać się z dwóch warstw. Pierwsza „programowa”, która estymuje temperaturę wewnętrzną półprzewodników i ogranicza możliwości przegrzania się struktury klucza. Druga „sprzętowa”, która bezpiecznie wyłączy tranzystory, które pracują w stanie zwarcia. Współpraca tych dwóch warstw gwarantuje pewne i bezpieczne wygaszenie przekształtnika, pracującego w stanach zaburzeniowych oraz ograniczenie wprowadzania zakłóceń do sieci elektroenergetycznej. Wyniki prac symulacyjnych są podstawą do stworzenia szybkiego układu logicznego, którego zadaniem jest diagnoza stanu zakłóceńowego oraz łagodne wyprowadzanie tranzystora mocy ze stanu zwarcia.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Semikron – nota katalogowa tranzystora IGBT SKM300GA12T4.
2. Zieliński D., Lipnicki P., Jarzyna W., Synchronization of Voltage Frequency Converters with the Grid in the Presence of Notching, *COMPEL International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, No. 3, 2015.
3. F. Blaabjerg, K. Ma, and D. Zhou, “Power electronics and reliability in renewable energy systems,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, May 2012, pp. 19–30.
4. Strzelecki R., Technologie energoelektroniczne w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych. *Zeszyty Naukowe AM w Gdyni* 62 (2009), 164–189.
5. Knapczyk M., Pieńkowski K., Analiza nieliniowych metod sterowania przekształtnikiem sieciowym AC/DC, *Materiały Konferencyjne XIV Seminarium Technicznego KOMEL, Ustroń – Jaszowiec*, 2005.
6. Zieliński D.: Układ badawczy przeznaczony do analizy synchronizacji przekształtników sieciowych podczas zapadów napięcia. – *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2014, nr 2, s. 77–80.

THE IMPACT OF POWER ELECTRONICS CONVERTER IN PHASE FAILURE WORK ON THE POWER SYSTEM NETWORK

The paper presents the results and the analysis of the simulations during the power converter’s phase failure work and its impact on the power grid. There are the output current and voltage plots during disturbances in the article. They include open-circuit in one phase of the inverter, short-circuit of the converter’s branch, a system control failure and a ground fault of one phase that occur near the inverter. The numerical model, which is based on a research and simulations, is designed in the MATLAB/Simulink environment. It includes the three-level converter NPC (Neutral Point Clamped). It is controlled by VOC (Voltage Oriented Control) and build on the transistors IGBT. The systems like these are used to integrate the unstable renewable sources with the stable power grid, in the flexible alternating current transmission systems (FACTS) or in the converter station of High Voltage Direct Current systems (HVDC). The paper shows also the causes of the phase failure work and negative consequences for the converter’s components. The result of the research is the proposal model of an integrated protection of IGBT. The model of the protection of a transistor will be built and implemented to a DSP processor in the future.

Keywords: the phase failure work, short-circuit, the protection of IGBT, VOC