

The Impact of a Power Electronics Converter in Phase Failure Work on the Power System Network

Authors

Dariusz Zieliński
Katarzyna Przytuła

Keywords

phase failure work, short circuit, IGBT protection system, VOC, NPC

Abstract

The paper presents the impact of phase failure work on power converters. The study includes a three-level NPC inverter (Neutral Point Clamped), controlled by Voltage Oriented Control (VOC). The NPC converter integrates renewable energy sources with the power grid. The article includes a discussion about the causes of phase failure work and an analysis of the converter's failure and its impact on the power grid. The simulations were performed in MATLAB/Simulink. The study also includes the concept of an integrated protection for IGBTs, controlled by the DSP microprocessor system.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016314

1. Introduction

The development of distributed energy, based on a high number of renewable sources, causes the fact that more and more power converters are connected to the power grid. The converters are interfaces between a parametrically unstable renewable source and the stable power grid [1].

During a converters' work in such configurations there always appears a transient fault or a short time overload. These disruptive effects influence the distribution network, especially when distributed energy of great power is connected to the grid. One example of this state is the power electronics converter in phase failure work.

It can be a big source of disturbances and a danger for sensitive devices which work near the converter. An effective diagnosis, rapid security, reliability and software with the ability to recognise disturbances in the grid are the main aims for today's power electronics.

This paper presents a model of a three-level NPC inverter (Neutral Point Clamped) with VOC control. The model was simulated in Matlab/Simulink environment. The research was made for the power electronics converters in phase failure work. The results of the research are emergency scenarios of switching on high-power converter branches and integrated IGBT protection, which is controlled by the DSP microprocessor system. The proposed protection is the next stage of the research. The main aim is improving the reliability of the converters and minimising their impact during faulty work on the power grid.

2. Phase failure work and its causes

A converters' phase failure work is its emergency work. It is mainly due to a ground fault of the distributed network. Ground faults appear several times a year, usually because of weather factors like storms, catastrophic frost on power wires, trees fallen by the storm, etc. The causes of phase failure work can also be a short circuit in a wind power generator, a failure of photovoltaic panels, or human error.

Phase failure work is a danger for power converters. It can cause the next failure, which leads to the destruction of the inverter. To reduce the faults, it is necessary to design an advanced security system, which protects the sensitive semiconductor devices and eliminates phase failure work.

The basic protection of the thyristor power electronic system are fast fuses or short-circuit relays that can work with current transformers [2]. Modern converters are built using fully controlled devices such as transistors IGBT [3]. These devices are faster than thyristors and offer the possibility of a rapid and correct current control.

These features reduce the complexity of the control system and the dimensions of the inverter. On the other hand, the usage of power transistors in the inverter reduces the system's short-circuit capability. The structure of the transistor with the insulated gate is softer. For this reason, systems of individual or group protection are used to shield the transistors. An example of such a protection system is shown in Fig. 1a.

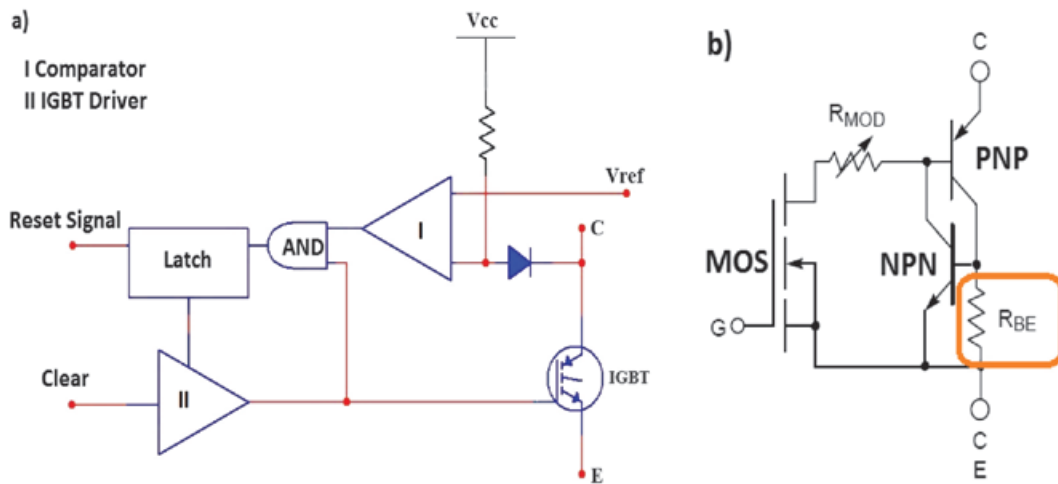


Fig. 1a) The block scheme of an IGBT protection system, b) the model of an IGBT transistor used in the research

The system’s principle of operation shown in Fig. 1b is based on the voltage measurement on the transistor’s junction between the collector and the emitter (V_{CE}). The voltage V_{CE} suddenly increases during a short-circuit, which is caused by a high current flow through the internal resistance of the transistor R_{BE} . When the voltage exceeds a limit value V_{ref} , the comparator changes the logical state to the opposite value. When the comparator of the logical state is changed, the IGBT transistor turns off and the control system is blocked.

Based on the block scheme in (Fig. 1a) a numerical model of functional protection was developed, described in section 3.

3. The NPC power converter model working with the grid

The simulation model (Fig. 2) was designed in MATLAB/Simulink in order to analyse phase failure work. It is assumed that the converter meets the unusual requirements of work during dynamic states, typically for flexible AC transmission systems (FACTS) [5].

This property is guaranteed by the control system whose construction is based on the Voltage Oriented Control (VOC). This algorithm comes from the field-oriented control (FOC) method, used in the drive system [1].

The parameters of the PI controller’s algorithm are chosen by analysis of the mathematical model and by simulation studies, on the basis of Ziegler-Nichols criterion. The model consists of a non-linear PID controller, called “Anti-Wind Up” [6]. Thus the system with minimal overshoot has a faster response than the system with linear PI controllers.

The structure of the Inverter-control block consists of the synchronisation system – a converter with the network, called Phase Locking Loop (PLL). It is responsible for the correct synchronisation of the inverter with the power grid [7]. The PLL algorithm is based on a modified method of synchronously rotating reference frame – Synchronous Reference Frame (SRF) [1]. The algorithm is chosen by the criterion of maintaining synchronism in the disturbance states. Synchronisation is very important for the

Parameter	value
Voltage	380 V
Inductance of choke coupling	2.5 mH
Nominal voltage of a low voltage network	400 V
Inductance of a low voltage network	15 mH
Resistance of a low voltage network	0,5 Ω
The capacity of the DC bus capacitors	1 mF
Active current of the I_d converter	20 A
Reactive current I_q	0 A

Tab. 1. The parameters of the low voltage power system modelled

converter’s work and its correctness has a huge impact on the quality of the research.

Signals generated by the FOC algorithm are applied to the spatial modulator SVM (Space Vector Modulator) [8]. It generates a sequence of PWM signals for the converter, which consists of twelve IGBTs.

When the simulation starts, the circuit breaker is opened and when the inverter is synchronised with the network, it closes automatically. The study was conducted with the idea of taking into account most of the possible scenarios of emergency work. Events are based on deliberate control blocking or parameter modification, such as voltage V_{CE} for individual transistors. A model power converter is connected to a low voltage power system by a switch. The most important parameters of the model are shown in Tab. 1.

The power converter’s model is a simulation program with the copyright simulation model of the IGBT. The IGBT model includes effects such as saturation and the rise and fall time of the current. The voltage drop on the collector-emitter junction (Fig. 1b) is very important because of the short-circuit protection which is applied to the logical protection system, shown in Fig. 3.

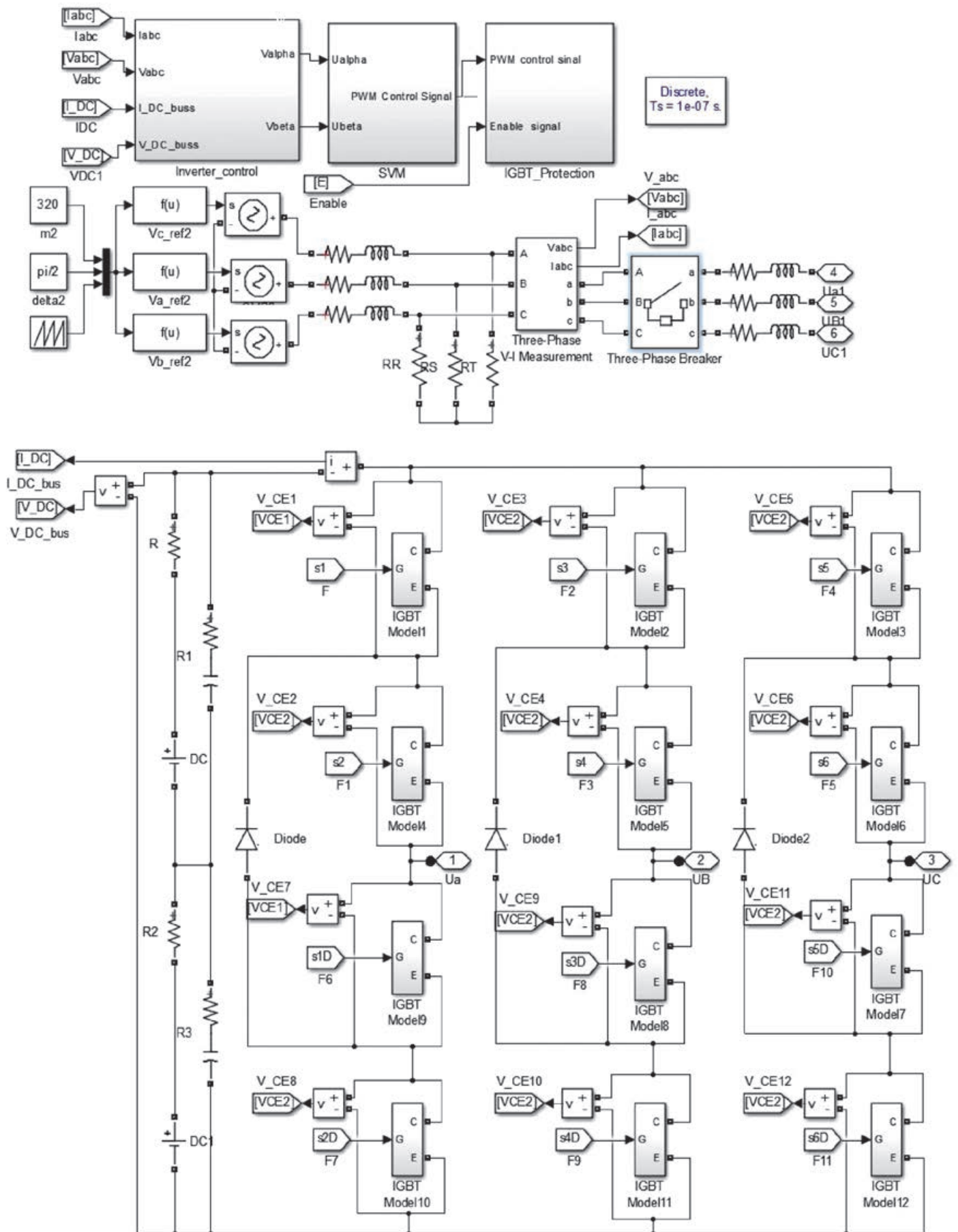


Fig. 2. A model presenting the organisation of individual sub-assemblies of the examined converter

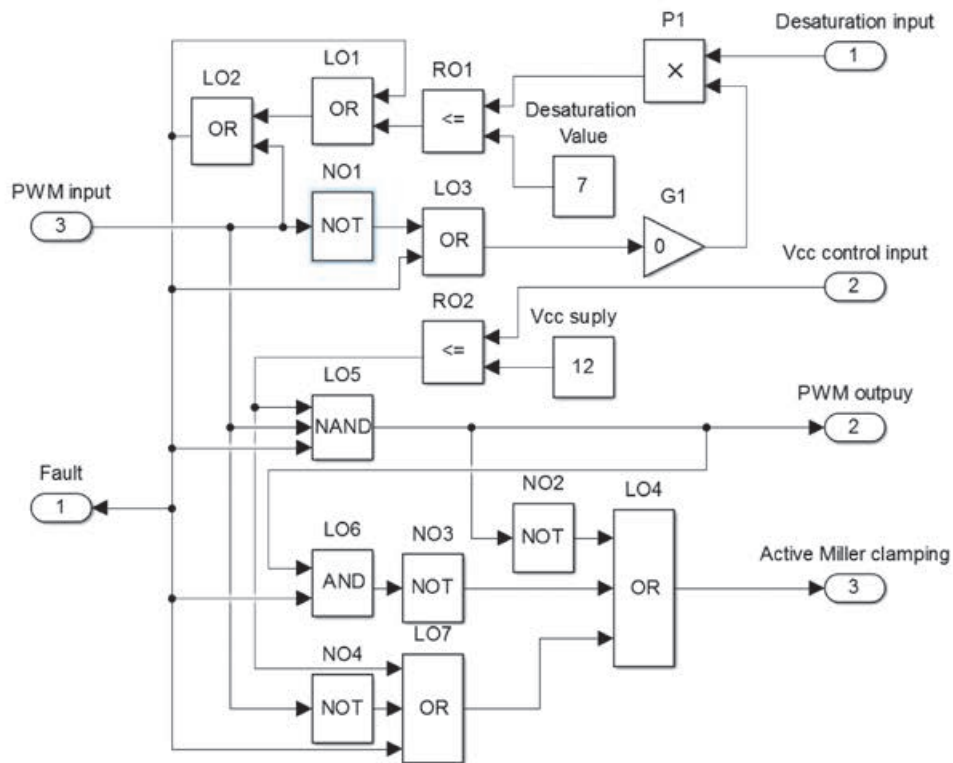


Fig. 3. The full protection model of a high power IGBT transistor

The main task of the protection system is to detect a transistor's saturation and turn off the short circuit. The output signal "error detection" is transmitted to the other logical structures to turn off the other transistors immediately and to block the phase failure work. A protection system against losing the control voltage and active Miller capacitance is also added [9].

The logical model is the basis of programming the TMS320F28069 DSP processor (from Texas Instruments). In the future, the logical model will include additional elements of short circuit detection:

- a precisely controlled time delay of 2–12 ms to avoid unnecessary activation of protection system while switching the transistor
- a graded system of switching the transistor, designed to provide protection against overvoltage coming from the parasitic inductance of the DC converter's circuits.

Assumptions for designing the laboratory model are defined as follows:

- protection of the IGBT during transient states of the power grid
- minimising the impact of the inverter's internal short-circuit on the distribution network
- estimation of the semiconductor temperature and blocking the gate signal until the transistor recovers its short-circuit capacity
- gradual turning on and off of the transistor to reduce EMI disturbances
- blocking an uncontrolled switching of the transistor's gate caused by Miller capacitance
- improving the reliability of the converter systems.

4. The study of the phenomena of phase failure work

Phase failure work is an emergency status which occurs when the voltage on the damage phase is close to zero. This condition can appear in the following cases:

- open-circuit in one phase of the inverter
- short-circuit of the converter's branch
- control failure of the IGBT
- phase-to-ground fault near the inverter.

The series of measurements were simulated during periodic faults. Research of the periodic faults during the stable work of the grid was simulated to show whether the converter is able to work properly after faults and what is the role of the control system in this case. The simulation model is shown in Fig. 2. The selected simulation results are presented in the waveforms in Fig. 4–9. A failure occurs in 0.4 s and lasts for 0.1 s in each of the tests.

4.1. Open-circuit in one phase of the inverter

The output current wave in inverter and generator, during the open circuit in one phase, is shown in Fig. 4a and 4b. Before the fault, the converter covers 75% of the power load. In 0.4 s of simulation time, the converter reduces the current injected to the network. There are high harmonics in the current wave, which impact on the load's voltage (Fig. 5b). The chosen protection system does not react to the fault.

4.2. Short-circuit of the converter's branch

A phase-to-ground fault of the load is simulated near the inverter (Fig. 6). Due to the loss of power in one of the phases, the inverter partly lost synchronisation with the grid. This is indicated by

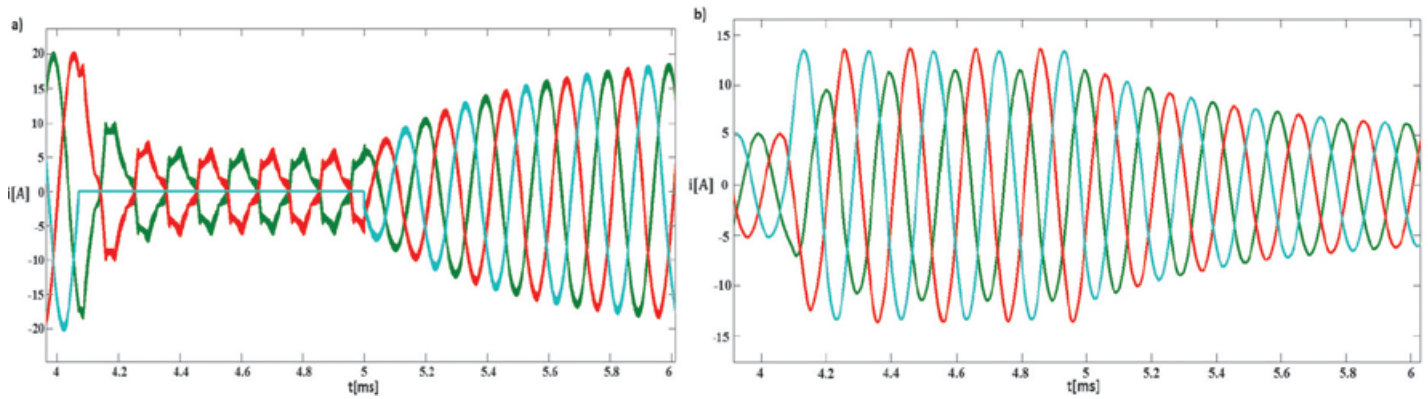


Fig. 4. Open-circuit of the phase: a) the output current in the inverter, b) the output current in the generator

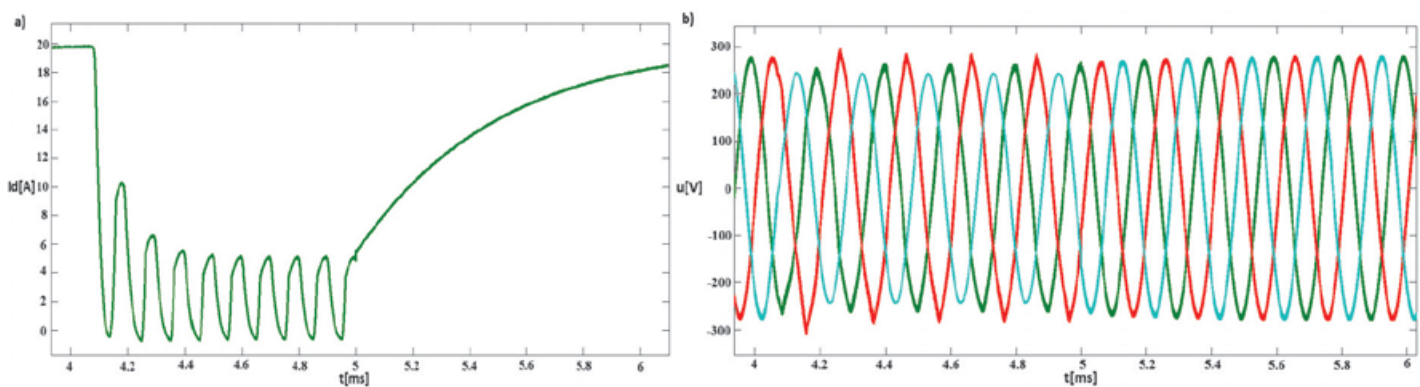


Fig. 5. Open-circuit of the inverter phase: a) the output current in the inverter, b) the output current in the load

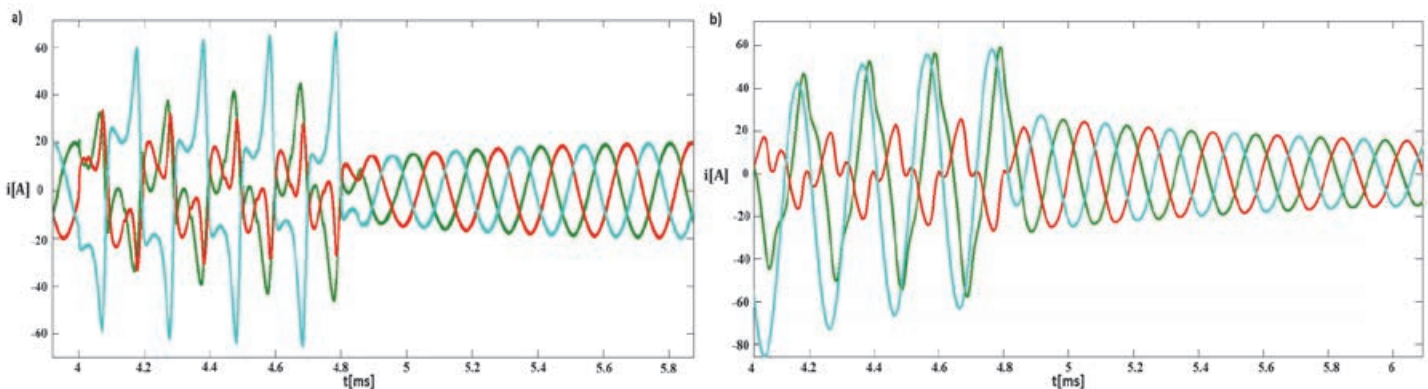


Fig. 6. Short-circuit in the inverter phase: a) the output current of the inverter, b) the output current at the generator terminals

the current rise above the reference value (Fig. 5a and 6a). The inverter has lost controllability and it is a serious threat for the loads in the power grid. The voltage on the load is deformed, and the converter's work failure results in an unacceptable value of the nominal voltage in the power grid (Fig. 7b). As a result, the VOC control is not coping with the highly unbalanced load occurring close to the inverter. In such cases, it is recommended to turn off the inverter immediately [11].

It should be mentioned that the simulation of the phase inverter fault is carried out with a locked protection. When the protection

is enabled, it turns off the inverter in the first half-period of time after the fault occurs.

4.3. Control failure of the IGBT

The next disturbance is the short-circuit in the low half-bridge. The result is shown in Fig. 8. This kind of interference can be simulated by numerical software. In each of the upper half-bridge switching cycles a through current flows, and its value can run to hundreds of Amperes. The cause of this situation is the large capacity of the low impedance capacitors on the DC bus.

If the protection system does not turn off the faulty circuit within 50 ms, the half bridge will be damaged or the semiconductors can explode.

The half bridge fault does not make a substantial impact on the power grid. The current feedback detects the energy flow from the inverter to the power grid, like in Fig. 9a, and reduces the duty cycle to a minimum. The deformation of the output voltage wave is huge due to a half-bridge damage (Fig. 10b). The internal short-circuit of the inverter is not dangerous for the network. When the failure occurs, the short-circuit current is limited by the inductance of the coupling choke. Next, the fuse installed on the DC bus should blow or the system (Fig. 1) should turn off the other transistors of the inverter. The speed of the short-circuit protection allows to avoid a through short-circuit.

5. Conclusions

This paper presents an investigation of phase failure work and its impact on the transient parameters of the three-level grid converter, which integrates renewable sources with the power grid. The research was done for two conditions: first when the cause of the phase failure work comes from the inverter, and second when it comes from the power grid. Particular attention was paid to the amplitude and dynamics of the current, the possibilities of protecting the inverter from damage and returning to stable work after the faults are fixed.

The paper confirms that phase failure work is an emergency mode and it is dangerous for the inverter. On the basis of simulation results it was concluded that protracted operation of the inverter is unacceptable during phase failure work. Even

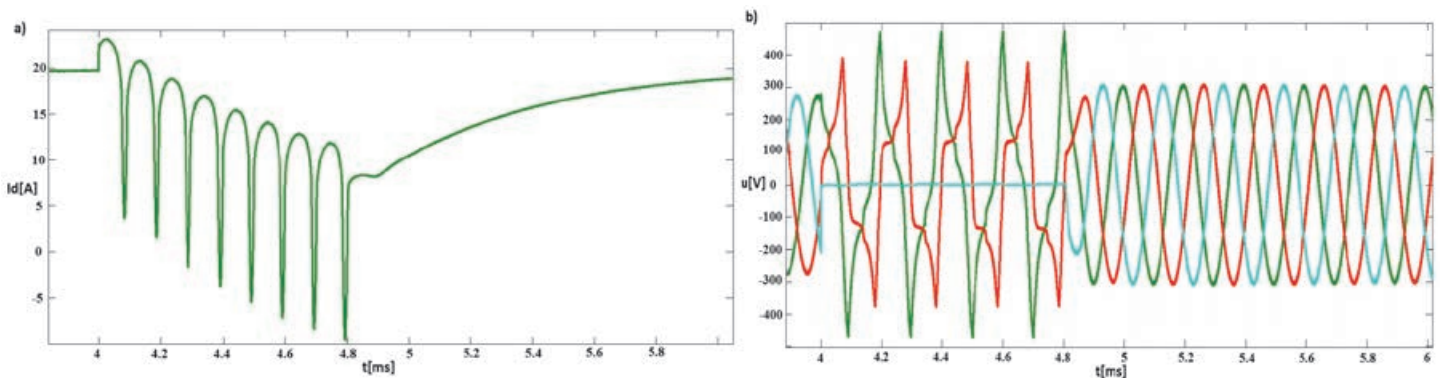


Fig. 7. Short-circuit in the inverter phase: a) I_d current of the inverter, b) voltage on the load

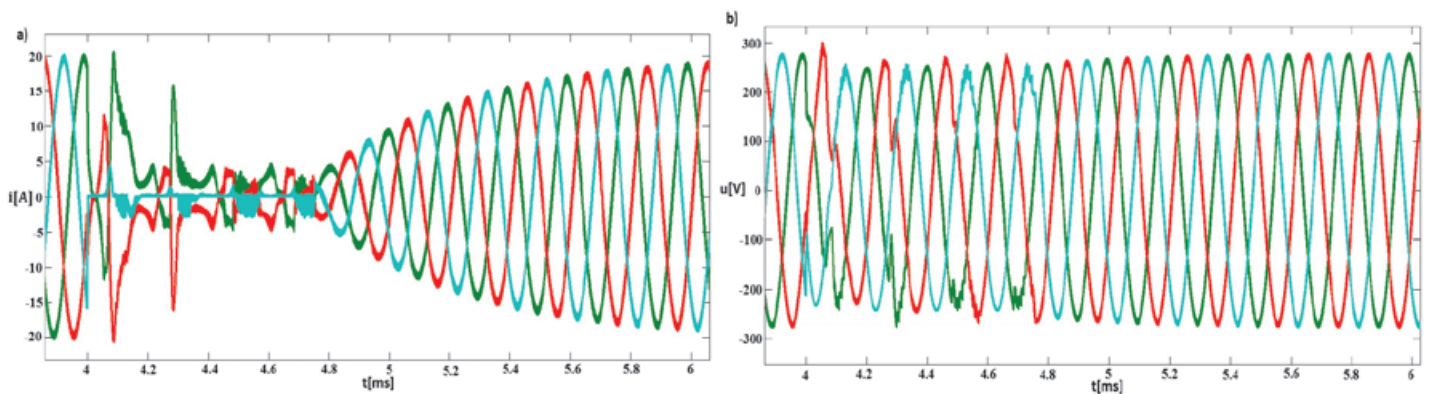


Fig. 8. A short-circuit of the low half bridge: a) the output current of the converter, b) the voltage fault impact on the grid

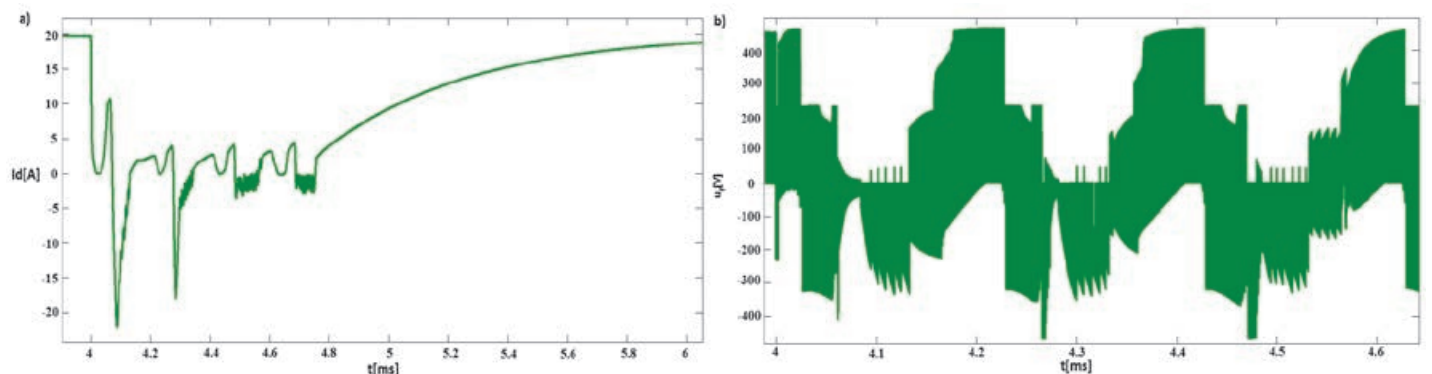


Fig. 9. A short-circuit of the low half bridge: a) I_d current of the converter, b) the voltage in the input of the filters

a temporary failure of the inverter causes changes in the current and voltages of high-speed rise and high amplitude. This runs the risk of a permanent damage to the inverter's components. The inverter does not meet the standards concerning the limits of high harmonics injected into the power grid and in some cases it loses controllability. To prevent incidents like these, the semiconductor devices should be equipped in the protection systems described in the second part of the paper.

Phase failure work due to faults from the power grid is not so dangerous for the components of inverters and allows a return to the stable work of the system after the faults are fixed.

The results of the simulation are the basis of a fast logical system whose main task will be diagnosing the fault and protecting the power transistors. Future study also includes a control system protecting the inverter itself and the integrated the power grid against phase failure work, as well as a control structure that allows to work with a highly unbalanced system load.

REFERENCES

1. D. Zieliński, P. Lipnicki, W. Jarzyna, 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.
2. F. Blaabjerg, K. Ma, D. Zhou, Power electronics and reliability in renewable energy systems, *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, May 2012, pp. 19–30.
3. R. Strzelecki, Technologie energoelektroniczne w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych, *Zeszyty Naukowe AM w Gdyni*, No. 62 (2009), pp. 164–189.
4. Semikron – nota katalogowa tranzystora IGBT SKM300GA12T4.
5. A.B. Arsoy et al., STATCOM-SMES. *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 2, 2003, pp. 21–28.
6. M. Knapczyk, K. Pierńkowski, Analiza nieliniowych metod sterowania przekształtnikiem sieciowym AC/DC, *Materiały Konferencyjne XIV Seminarium Technicznego KOMEL, Ustroń-Jaszowiec*, 2005.
7. D. Zieliński, Układ badawczy przeznaczony do analizy synchronizacji przekształtników sieciowych podczas zapadów napięcia. – *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, nr 2, 2014, pp. 77–80.
8. M. Ikonen, O. Laakkonen, M. Kettunen, Two-level and three-level converter comparison in wind power application, www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/15.pdf.
9. Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS. General Considerations for IGBT and Intelligent Power Modules. Sept. 1998.
10. Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS. Using IGBT Modules. Sept. 1998.
11. M. Knapczyk, K. Pierńkowski, High-Performance Decoupled Control of PWM Rectifier with Load Compensation, *Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej*, No. 60, *Studia i Materiały*, No. 27, 2007.

Dariusz Zieliński

Lublin University of Technology
 e-mail: shadow031@gmail.com

He gained his Master's degree in electrical engineering, specialising in microprocessor drives in industrial automation in the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science at the Lublin University of Technology (2013). Currently a PhD student in the Department of Electrical Machines and Drives of that university. Deals with issues of power electronic, equipment design used primarily in electric power grid and real-time systems.

Katarzyna Przytuła

Lublin University of Technology
 e-mail: poczta.katarzyna@gmail.com

She gained her Master's degree in electrical engineering, specialising in power engineering in the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science at the Lublin University of Technology (2014). Currently a PhD student in the Department of Electrical Machines and Drives of that university. Deals with issues of control devices in power electronics, used primarily in electric power grid. Does research in interleaved converters.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 155–161. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Wpływ niepełnofazowej pracy energoelektronicznego przekształtnika sieciowego na system elektroenergetyczny

Autorzy

Dariusz Zieliński
Katarzyna Przytuła

Słowa kluczowe

praca niepełnofazowa, zwarcia, zabezpieczenia kluczy IGBT, VOC, NPC

Streszczenie

Artykuł przedstawia wpływ pracy niepełnofazowej na pracę przekształtnika energoelektronicznego. Do badań wykorzystano 3-poziomowy przekształtnik NPC (ang. *Neutral Point Clamped*), sterowany metodą napięciowo zorientowaną VOC (ang. *Voltage Oriented Control*). 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.

1. Wstęp

Rozwój energetyki rozproszonej, opartej na dużej liczbie 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 [1]. Pracy układów przekształtnikowych w takich konfiguracjach towarzyszą przemijające zwarcia lub chwilowe przeciążenia. Te stany zakłóceniewe nie pozostają bez wpływu na sieć przesyłową, w szczególności gdy przyłączane są źródła rozproszone o dużych mocach. Jednym z przykładowych stanów jest praca niepełnofazowa uszkodzonego przekształtnika. Może być dużym źródłem zakłóceń, a nawet zagrożeniem dla czułych odbiorników pracujących w pobliżu przekształtnika. Odpowiednia diagnostyka, szybkie zabezpieczenia, niezawodność oraz oprogramowanie odznaczające się zdolnością do rozpoznawania zakłóceń to cele stawiane dzisiejszej energoelektronice.

W artykule przedstawiono model przekształtnika 3-poziomowego NPC (ang. *Neutral Point Clamped*) ze sterowaniem VOC. Model symulacyjny opracowano w programie MATLAB/Simulink. Badania przeprowadzono dla pracy niepełnofazowej przekształtników. Efektami prac badawczych

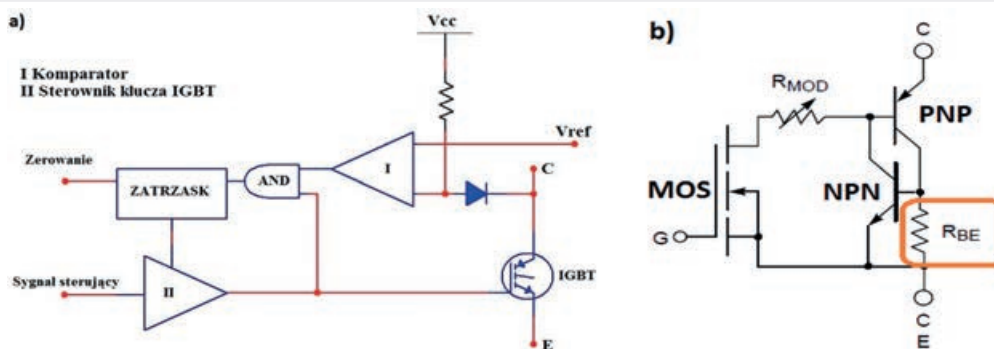
są scenariusze awaryjnych włączeń gałęzi przekształtników dużej mocy, a także propozycja zintegrowanego zabezpieczenia klucza IGBT sterowanego za pomocą mikroprocesorowego systemu DSP. Proponowane zabezpieczenie stanowi kolejny etap badań rozwojowych. Ma on na celu zwiększenie niezawodności pracy badanych przekształtników i minimalizacji wpływu ich błędnego działania na sieć elektroenergetyczną.

2. Praca niepełnofazowa przekształtnika i jej przyczyny

Praca niepełnofazowa przekształtnika energoelektronicznego jest awaryjnym stanem pracy i spowodowana jest głównie występowaniem doziemień sieci przesyłowej. Doziemienia te występują wielokrotnie w ciągu roku, a powstają najczęściej wskutek czynników atmosferycznych, tj.: burz, szadzi katastroficznej na przewodach linii elektroenergetycznej, powalonych przez wichury drzew itp. Przyczyny pracy niepełnofazowej mogą pochodzić nie tylko od strony linii przesyłowej, ale również od zwarć w obwodzie generatora elektrowni wiatrowej, awarii paneli fotowoltaicznych lub błędów obsługi. Praca niepełnofazowa stanowi poważne zagrożenie dla przekształtników energoelektronicznych. Może ona być przyczyną kolejnych awarii prowadzących w konsekwencji do zniszczenia przekształtnika. Aby

ograniczyć występowanie takich stanów awaryjnych, buduje się zaawansowane obwody zabezpieczeń, których celem jest ochrona wrażliwych elementów półprzewodnikowych oraz wyeliminowanie możliwości pracy niepełnofazowej.

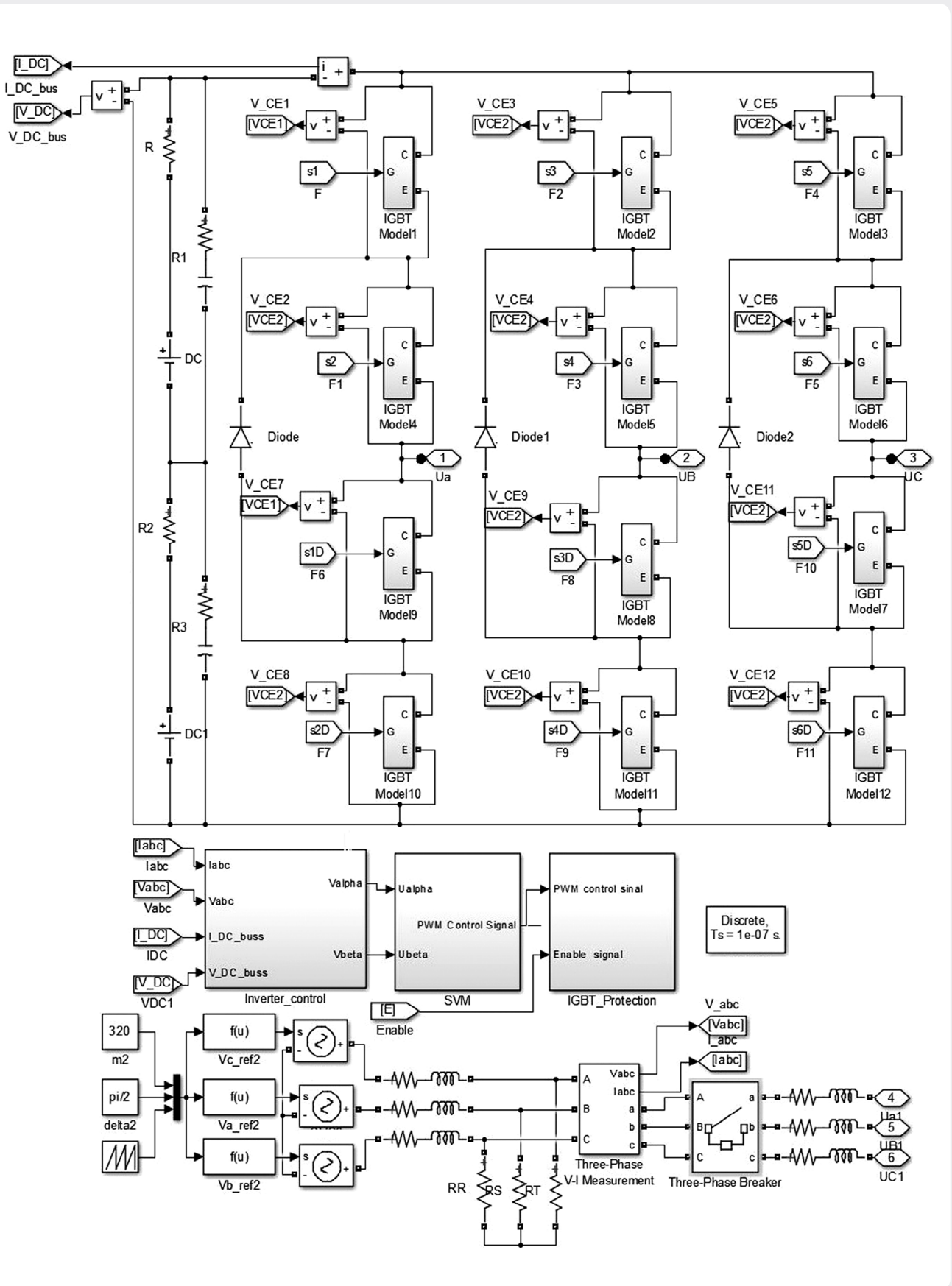
Podstawowym zabezpieczeniem dla tyrystorowych układów energoelektronicznych są szybkie bezpieczniki topikowe lub przekaźniki zwarciovowe, mogące pracować z przekładnikami prądowymi [2]. Nowoczesne przekształtniki buduje się w oparciu o układy w pełni sterowane, tj. tranzystory IGBT [3]. Układy te są wielokrotnie szybsze od tyrystorów oraz dają możliwość szybkiej i dokładnej kontroli prądu w pełnym zakresie pracy. Cechy te redukują w znacznym stopniu poziom złożoności sterowania i pozwalają na redukcję gabarytów przekształtnika. Z drugiej strony stosowanie tranzystorów mocy w układach przekształtnikowych znacząco obniża zdolność zwarciovą układu. Struktura tranzystora z izolowaną bramką jest znacznie delikatniejsza. Z tego powodu stosuje się układy ochrony grupowej lub indywidualnej tych kluczy tranzystorowych. Przykładem takiej ochrony jest układ przedstawiony na rys. 1a. Zasada działania przedstawionego na rys. 1b układu oparta jest na pomiarze spadku napięcia na złączu kolektor-emiter (V_{CE}) tranzystora. W momencie wystąpienia



Rys. 1. a) Schemat blokowy zabezpieczenia IGBT, b) Model tranzystora IGBT wykorzystywany w badaniach

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 155–161. When referring to the article please refer to the original text.

PL



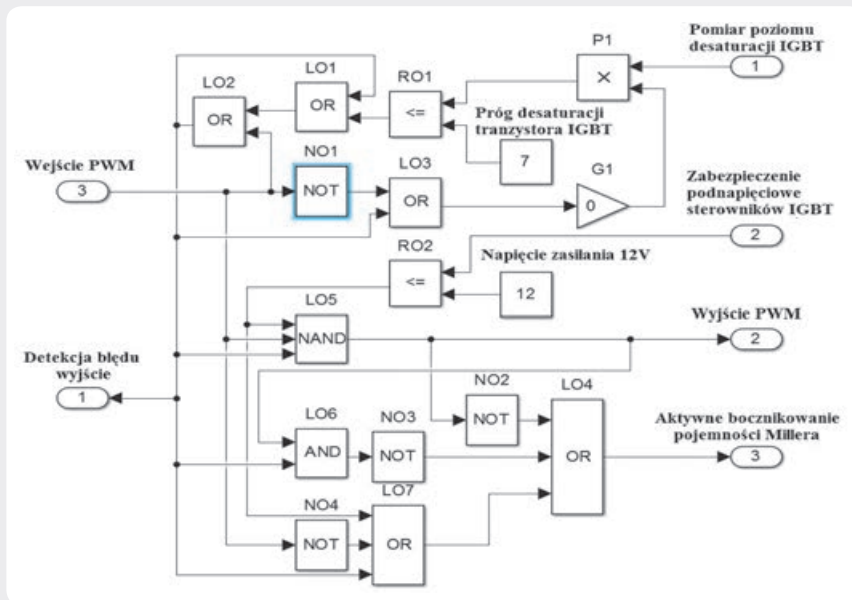
Rys. 2. Model przedstawiający organizację poszczególnych podzespołów badanego przekształtnika

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 155–161. When referring to the article please refer to the original text.

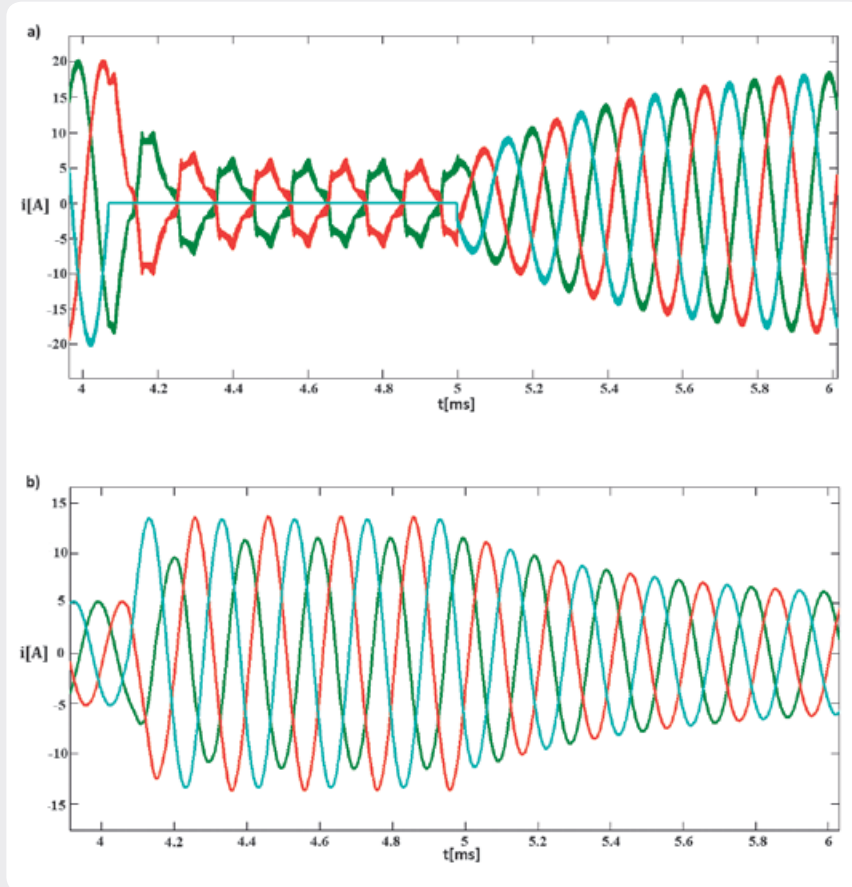
PL

zwarcia następuje gwałtowny wzrost napięcia V_{CE} , który spowodowany jest przepływem dużego prądu przez rezystancję wewnętrzną tranzystora R_{BE} [4]. Gdy napięcie przekroczy nastawiony próg

ochrony V_{ref} , komparator zmienia stan logiczny na przeciwny. Zmiana stanu logicznego komparatora skutkuje wyłączeniem tranzystora IGBT i zablokowanie sterowania. Na podstawie schematu



Rys. 3. Kompleksowe zabezpieczenie tranzystora IGBT dużej mocy



Rys. 4. Przerwa fazy przekształtnika: a) prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika, b) prąd na zaciskach generatora

Parametr	Wartość
Napięcie w punkcie przyłączenia	380 V
Indukcyjność dławika sprzęgającego	2,5 mH
Znamionowe napięcie sieci nn	400 V
Indukcyjność sieci nn	15 mH
Rezystancja sieci nn	0,5 Ω
Pojemność kondensatorów szyny DC	1 mF
Prąd czynny przekształtnika I_d	20 A
Prąd bierny I_q	0 A

Tab. 1. Parametry modelu badanej sieci elektroenergetycznej

blokowego z rys. 1a opracowano model numeryczny funkcjonalnego zabezpieczenia, które przedstawiono w rozdziale 3.

3. Model przekształtnika NPC do współpracy z siecią

W celu analizy pracy niepełnofazowej przekształtników energoelektronicznych zbudowano model symulacyjny w programie MATLAB/Simulink (rys. 2). Przyjęto, że przekształtnik spełnia wysokie wymagania pracy dynamicznej, charakterystyczne dla statycznych kompensatorów mocy biernej FACTS [5]. Własność tę gwarantuje zastosowany układ sterowania oparty na polowo zorientowanej kontroli wektora napięcia, określanej dalej VOC (ang. *Voltage Oriented Control*). Algorytm ten wywodzi się z polowo zorientowanej metody sterowania wektorowego stosowanej do układów napędowych, określanej jako FOC (ang. *Field Oriented Control*) [1].

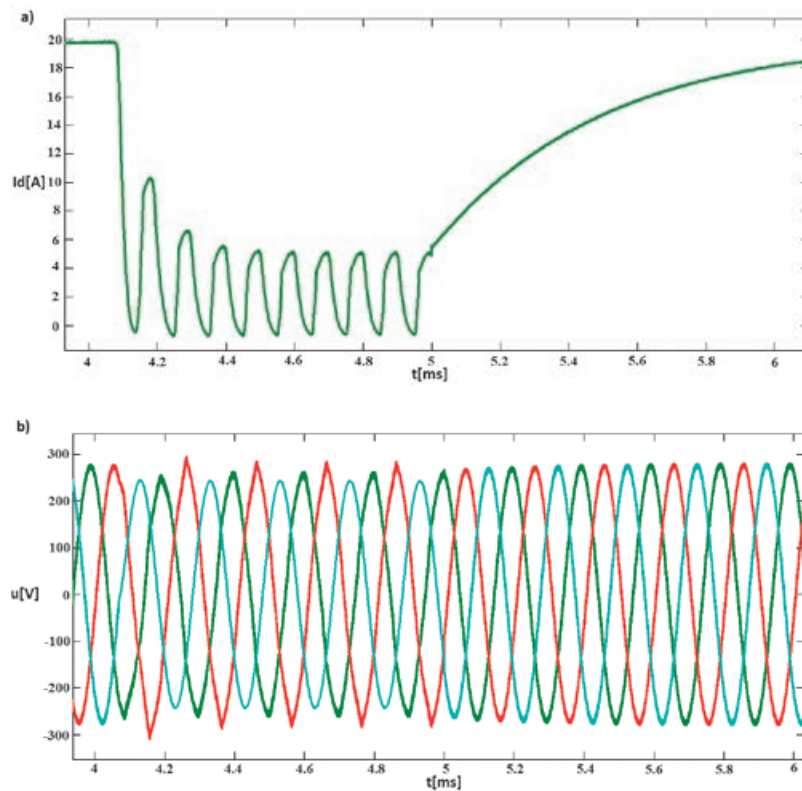
W wyniku analizy modelu matematycznego oraz badań symulacyjnych dobrano parametry nastaw czterech algorytmów PI zbliżone do kryterium Zieglera-Nicholsa. Dodatkowo zastosowano nieliniową korekcję Anty-Wind Up [6], dzięki czemu, przy minimalnym przeregulowaniu, tak zoptymalizowany układ charakteryzuje się znacznie większą szybkością odpowiedzi niż układ z liniowymi regulatorami PI.

Blok Inverter-control zawiera w swej strukturze system synchronizacji z siecią określanej jako PLL (ang. *Phase Loop Locking*), który odpowiada za poprawną synchronizację przekształtnika z siecią elektroenergetyczną [7]. Algorytm PLL oparty jest na modyfikowanej metodzie z wirującym synchronicznie układem odniesienia – SRF (ang. *Synchronous Reference Frame*) [1]. Dobór algorytmu PLL zrealizowano na podstawie kryterium utrzymania synchronizmu w stanach zaburzeniowych. Synchronizacja jest elementem kluczowym i jej poprawność ma ogromny wpływ na jakość prezentowanych badań.

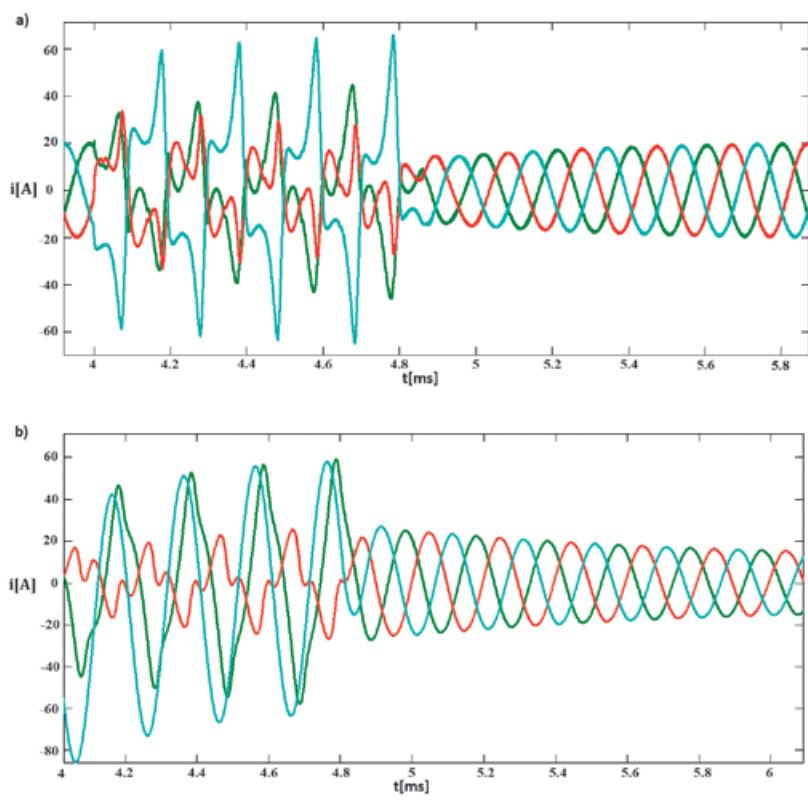
Sygnały wypracowane przez algorytm FOC są podawane do układu modulatora przestrzennego SVM (ang. *Space Vector Modulator*). Generuje on odpowiedni ciąg

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 155–161. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 5. Przerwa fazy przekształtnika: a) prąd I_d badanego przekształtnika, b) napięcie zmierzone na zaciskach obciążenia



Rys. 6. Zwarcie fazy przekształtnika: a) prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika, b) prąd na zaciskach generatora

sygnałów PWM dla układu przekształtnika złożonego z 12 tranzystorów IGBT [8].

W momencie startu symulacji wyłącznik jest otwarty i zamyka się automatycznie po osiągnięciu stanu pełnej synchronizacji przekształtnik – sieci. Badania prowadzono tak, by uzyskać większość możliwych scenariuszy awaryjnej pracy. Zdarzenia opierały się na celowym blokowaniu sterowania lub modyfikacji parametrów, tj.: spadku napięcia V_{CE} poszczególnych tranzystorów. Modelowy przekształtnik energoelektroniczny sprzężono za pomocą wyłącznika z modelem słabej sieci energetycznej, pracującej na napięciu nn. Najważniejsze parametry modelu przedstawia tab. 1.

Wymieniony modelowy przekształtnik energoelektroniczny to stworzony na potrzeby prac badawczych program symulacyjny z autorskim modelem tranzystora IGBT. Model ten uwzględnia efekty, tj.: nasycenie oraz czas narastania i opadania prądu. Istotny ze względu na ochronę zwarciową spadek napięcia powstający na złączu kolektor-emiter (rys. 1b) jest podawany na układ zabezpieczenia logicznego przedstawiony na rys. 3.

Zadaniem układu zabezpieczającego jest wykrycie nasycenia tranzystora oraz podjęcie akcji wyłączania zwartego obwodu. Wyprowadzenie sygnału „Detekcja błędu” jest przekazywane do innych struktur logicznych w celu natychmiastowego wygaszenia pozostałych tranzystorów i zablokowania ewentualnej pracy niepełnofazowej. Dodano również obwody zabezpieczające przed zanikiem napięcia sterującego oraz aktywne bocznikowanie pojemności Millera [9].

Tak opracowany model logiczny jest podstawą do zaprogramowania procesora DSP TMS320F28069 firmy Texas Instruments. W przyszłości przewiduje się rozbudowanie modelu logicznego o dodatkowe układy kwalifikacji zwarcia:

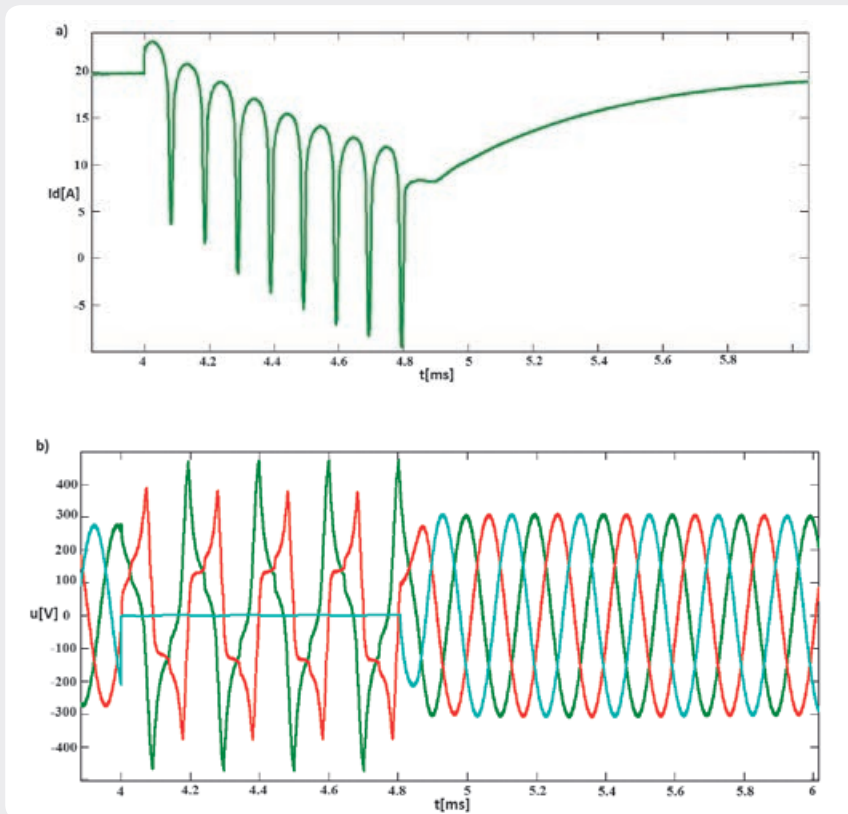
- precyzyjnie kontrolowanej zwłoki czasowej 2–12 ms, mającej na celu uniknięcie zbędnego zadziałania zabezpieczenia podczas operacji przełączeniowej tranzystora [10]
- stopniowanego układu wyłączania tranzystora, mającego na celu zapewnić ochronę przed ewentualnym przepięciem pochodzącym od indukcyjności pasożytniczych obwodów DC przekształtnika [10].

Założenia do projektowanego laboratoryjnego modelu określono w następujący sposób:

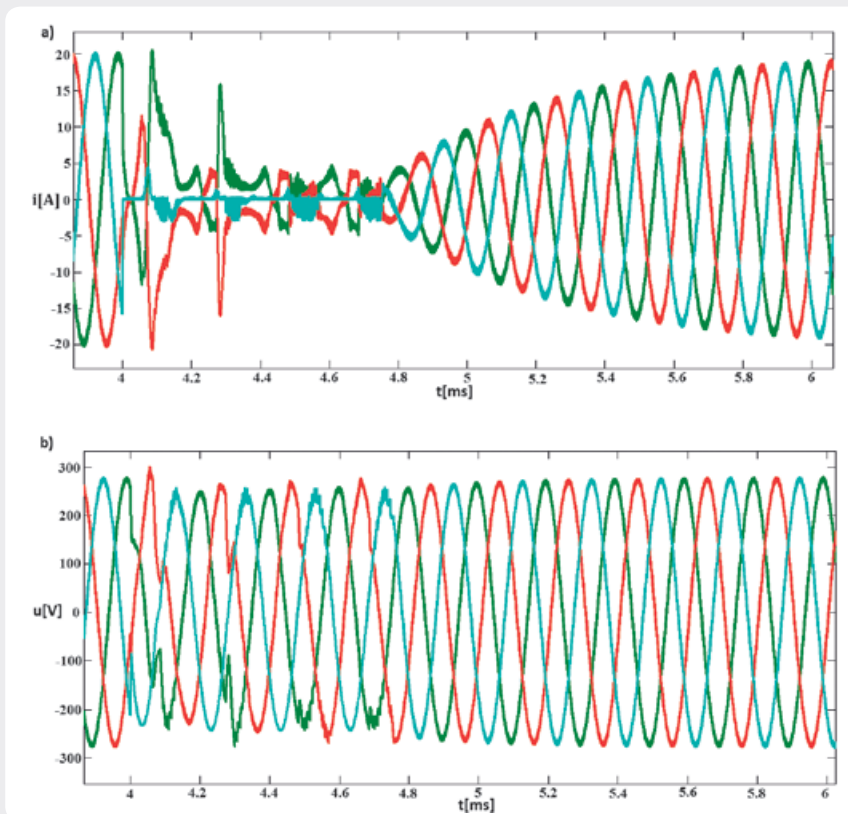
- ochrona klucza IGBT podczas stanów przejściowych sieci elektroenergetycznej
- minimalizacja wpływu skutków zwarcia wewnętrznego przekształtnika na sieć przesyłową
- estymacja temperatury struktury półprzewodnikowej oraz blokowanie sygnału bramkowego do momentu odzyskania pełnej zdolności zwarciowej klucza
- stopniowe włączanie i wyłączanie tranzystora przyczyniające się do redukcji zakłóceń EMI
- blokowanie niekontrolowanego załączania bramki tranzystora spowodowanego obecnością pojemności Millera
- poprawa niezawodności układów przekształtnikowych.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 155–161. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 7. Zwarcie fazy przekształtnika: a) prąd I_d badanego przekształtnika, b) napięcie zmierzone na zaciskach obciążenia



Rys. 8. Zwarcie dolnej pary tranzystorów półmostka: a) prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika, b) wpływ zwarcia na napięcie sieci

4. Badania zjawisk towarzyszących pracy niepełnofazowej

Praca niepełnofazowa jest rozumiana jako stan awaryjny, podczas którego napięcie na „chorej” fazie jest bliskie zeru. Taki stan może między innymi wystąpić dla następujących przypadków:

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

Dla wymienionych stanów awaryjnych wykonano serię pomiarów polegających na okresowym wystąpieniu pojedynczych zakłóceń. Badanie przypadków czasowego wystąpienia awarii miało na celu udzielenie odpowiedzi, czy po ustąpieniu awarii możliwy jest powrót do poprawnej pracy przekształtnika i jakie są wymagania względem układu sterowania. Badania prowadzono na modelu przekształtnika opracowanym i przedstawionym na rys. 2. Wybrane wyniki symulacji przedstawiono w postaci oscylogramów (rys. 4–9). Dla każdego z testów przyjęto wystąpienie awarii dla czasu 0,4 s, a czas trwania założono równy 0,1 s.

4.1. Przerwa w jednej fazie przekształtnika

Przebiegi prądów na zaciskach przekształtnika i generatora, podczas przerwy w jednej fazie przekształtnika, przedstawiono na rys. 4a–b. Przed wystąpieniem zakłócenia przekształtnik pokrywał 75% zapotrzebowania na moc obciążenia (rys. 4b).

W chwili $t = 0,4$ s przekształtnik znacznie obniżył prąd wydawany do sieci. W prądzie zaobserwowano wyższe harmoniczne, które nie pozostały bez wpływu na napięcie odbiornika (rys. 5b). Przyjęty typowy układ zabezpieczeń nie ma podstawy do reagowania na takie zaburzenie.

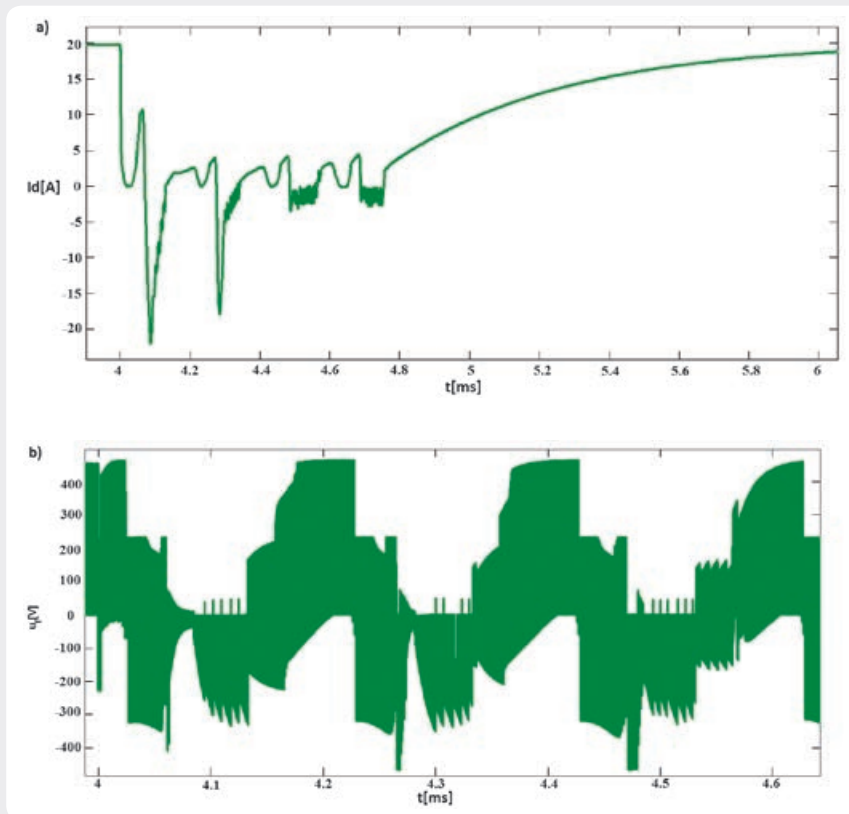
4.2. Zwarcie pary kluczy półmostka

Zwarcie doziemne jednej z faz odbiornika pracującego zasymulowano w pobliżu przekształtnika (rys. 6). Z powodu zaniku napięcia na jednej z faz przekształtnik utracił częściowo synchronizację. Świadczy o tym wzrost prądów powyżej wartości zadanej (rys. 5a i 6a). Przekształtnik utracił więc sterowność i stanowi poważne zagrożenie dla odbiorników pracujących w sieci. Napięcie na zaciskach odbiornika uległo znaczącej deformacji, a niewłaściwa praca przekształtnika spowodowała niedopuszczalne przekroczenie wartości znamionowej napięcia sieciowego w fazach zdrowych (rys. 7b). W rezultacie sterowanie VOC nie radzi sobie z silnie niezbalansowanym obciążeniem występującym w bliskim sąsiedztwie przekształtnika. W takich przypadkach zalecane jest bezzwłoczne wyłączenie przekształtnika [11].

Należy nadmienić, że symulację zwarcia fazy przekształtnika przeprowadzono z zablokowanym zabezpieczeniem. W przypadku prowadzenia badań z działającym zabezpieczeniem następowo wyłączenie przekształtnika już w pierwszym półokresie po wystąpieniu zakłócenia.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 155–161. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 9. Zwarcie dolnej pary tranzystorów półmostka: a) prąd I_d badanego przekształtnika, b) napięcie zmierzone przed filtrem przekształtnika

4.3. Awaria sterowania tranzystora IGBT

Dokonano zwarcia na dolnym półmostku przekształtnika (rys. 8). Ten rodzaj zakłócenia jest praktycznie tylko możliwy do realizacji za pomocą 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 μ s, spowoduje całkowite zniszczenie półmostka, a nawet wybuch samych elementów półprzewodnikowych.

Wpływ zwartego półmostka na sieć elektroenergetyczną nie jest znaczący. Sprzężenie zwrotne kontroli prądu wykrywa przepływ energii od sieci do przekształtnika (rys. 9a) i ogranicza poziom wypełnienia PWM do minimum. Z powodu uszkodzenia półmostka deformacja napięcia na wyjściu przekształtnika jest znaczna (rys. 9b). Zwarcie wewnętrzne przekształtnika nie jest zbyt groźne dla sieci. W pierwszej chwili wystąpienia awarii prąd zwarcioowy jest ograniczany przez indukcyjność dławika sprzęgającego. Następnie powinno nastąpić przepalenie wkładek topikowych, zainstalowanych na szynie DC przekształtnika, lub szybkie wyłączenie starowania pozostałych kluczy za pomocą zabezpieczenia zaprezentowanego w rozdziale 2. Szybkość działania zabezpieczenia pozwoli uniknąć zwarcia skrośnego.

5. Wnioski

W artykule przedstawiono badania dotyczące wpływu pracy niepełnofazowej na parametry przejściowe 3-poziomowego przekształtnika sieciowego sprzęgającego układy generacji rozproszonej z siecią elektroenergetyczną. Badania przeprowadzono dla przypadków, kiedy przyczyny pracy niepełnofazowej tkwią wewnątrz samego przekształtnika bądź są skutkiem zaburzeń pochodzących od strony sieci elektroenergetycznej. Szczególną uwagę skupiono na amplitudzie i dynamice prądu, możliwości zabezpieczenia przekształtnika przed zniszczeniem oraz powrotu do normalnej pracy po ustąpieniu zaburzenia.

Artykuł potwierdza, że praca niepełnofazowa jest awaryjnym stanem pracy niebezpiecznym dla przekształtnika. Na podstawie wyników symulacyjnych stwierdzono, że nie jest dopuszczalna przedłużająca się praca przekształtnika w stanie pracy niepełnofazowej. Nawet przejściowa awaria przekształtnika powoduje zmiany prądu i napięcia o dużej szybkości narastania i dużej amplitudzie. Grozi to trwałym uszkodzeniem podzespołów przekształtnika. Badany przekształtnik nie spełnia ponadto normy określającej zawartość harmonicznych wprowadzanych do sieci, a w niektórych przypadkach traci sterowność. Aby zapobiec takim zdarzeniom, elementy półprzewodnikowe powinny być wyposażone w zabezpieczenia wskazane w części 2 artykułu. Natomiast praca niepełnofazowa spowodowana awariami poza przekształtnikiem jest mniej niebezpieczna dla

komponentów przekształtnika i umożliwia powrót do normalnej pracy po ustąpieniu zakłócenia.

Wyniki prac symulacyjnych będą podstawą do stworzenia szybkiego układu logicznego, którego zadaniem będzie diagnoza stanu zakłóceniewego oraz łagodne wyprowadzenie tranzystora mocy ze stanu zwarcia. Badania obejmują również pracę nad układami sterowania zabezpieczającymi sam przekształtnik oraz współpracującą siecią przed skutkami pracy niepełnofazowej, a także nad strukturami sterowania pozwalającymi na pracę z silnie niezbalansowanym układem obciążenia.

Bibliografia

- 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* 2015, No. 3.
- Blaabjerg F., Ma K., Zhou D., Power electronics and reliability in renewable energy systems, *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, May 2012, s. 19–30.
- Strzelecki R., Technologie energoelektroniczne w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni* 2009, nr 62, s. 164–189.
- Semikron, nota katalogowa tranzystora IGBT SKM300GA12T4.
- Arsoy A.B. i in., STATCOM-SMES, *IEEE Industry Applications Magazine* 2003, Vol. 2, s. 21–28.
- Knapczyk M., Pieńkowski K., Analiza nieliniowych metod sterowania przekształtnikiem sieciowym AC/DC, materiały konferencyjne XIV Seminarium Technicznego KOMEL, Ustroń – Jaszowice, 2005.
- 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.
- Ikonen M., Laakkonen O., Kettunen M., Two-level and three level converter comparison in wind power application [online], www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/15.pdf.
- Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS. General Considerations For IGBT and Intelligent Power Modules, Sept. 1998.
- Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS, Using IGBT Modules, Sept. 1998.
- Knapczyk M., Pieńkowski K., High-performance Decoupled Control Of PWM Rectifier With Load Compensation, *Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej* 2007, nr 60, seria Studia i Materiały 2007, nr 27.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 155–161. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Dariusz Zieliński

mgr inż.

Politechnika Lubelska

e-mail: shadow031@gmail.com

Ukończył studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność: napędy mikroprocesorowe w automatyce przemysłowej na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2013). Obecnie doktorant w Katedrze Napędów i Maszyn Elektrycznych macierzystej uczelni. Zajmuje się zagadnieniami projektowania urządzeń energoelektronicznych, stosowanych głównie w sieciach elektroenergetycznych oraz systemami czasu rzeczywistego.

Katarzyna Przytuła

mgr inż.

Politechnika Lubelska

e-mail: poczta.katarzyna@gmail.com

Ukończyła studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność: elektroenergetyka na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2014). Obecnie doktorantka w Katedrze Napędów i Maszyn Elektrycznych macierzystej uczelni. Zajmuje się projektowaniem sterowania urządzeń energoelektronicznych, stosowanych głównie w sieciach elektroenergetycznych oraz badaniami wielokanałowych przekształtników sieciowych.