

# Smart MV/LV distribution transformer for Smart Grid with active prosumer participation

## Author

Marek Adamowicz

## Keywords

Smart Grid, distribution transformer, power electronics

## Abstract

With the development of distribution networks and their gradual transformation into intelligent Smart Grid type networks the relevance and share of controlled power converter systems used as interfaces between energy sources and the grid, and between grid and the recipients, will grow. This paper elaborates on the concept of replacing conventional 50 Hz distribution transformers with intelligent distribution transformers. A solution of a three-stage smart distribution transformer of modular design is proposed, oriented to connecting prosumers as active recipients of electricity with enhanced requirements, and owners of small renewable energy systems (RES). Two active stages: AC-DC on the MV side and DC-AC on the LV side provide the ability to compensate reactive power and shape voltage parameters. The simulation results presented here confirm that the smart transformer's intermediate stage, through the use of isolated DC-DC converters with high-speed semiconductor devices, provides the ability to quickly adjust the power flow between the primary and secondary sides.

## 1. Introduction

In the coming years distribution grids will be subject to upgrades to improve power supply's reliability and efficiency, and to allow greater consumer involvement in its generation and more effective use. One of the most important European Union policy objectives for 2020 in this respect is to convert the existing distribution grids to Smart Grids [1, 2] that integrate the behaviours and actions of all users connected to them. Among the long-term challenges associated with the objective, the following deserve particular mention: local energy management, full integration of Smart Grids with distributed generation sources, integration with RES and central power plants, and intensification of the distributed generation connected close to end users. The need to deploy new technologies in distribution grids is related not only with the progressive increase in the number and powers of connected RES units, but also with the expected gradual increase in the number of electric car charging stations. In the latter case, particular attention should be paid to proposals of multi-vehicle quick charging stations, which due to their high power inputs might be connected to medium voltage (MV) grids.

With new legislative solutions supporting the RES development, it can be expected that more and more energy consumers will decide to adopt a proactive attitude of prosumers generating electricity in small domestic plants. Also expected is an increased number of RES systems integrated with intelligent buildings.

Distribution grid development strategies, such as those

implemented in the U.S. [3] and Germany [4], assume that in addition to the participation in power generation, prosumers will actively participate in the management of peak load in the system, making available electricity storage in their electric vehicles as part of the so-called vehicle-to-grid (V2G) infrastructure. In Denmark the V2G infrastructure development is closely related to further development of wind power, as exemplified by the E.D.I.S.O.N. pilot project implemented on the island of Bornholm [5, 6]. The E.D.I.S.O.N. project is meant to demonstrate in a separate 10 kV grid supplied from RES the feasibility of smooth interaction of the energy and transport sectors, in the framework of V2G infrastructure with the maximum total peak load of 25 MW. Work towards the transformation of distribution grids in Smart Grid are already in progress also in Poland, e.g. in the Pomeranian region [7].

In Smart Grids, RES and V2G systems can be new elements of the voltage and reactive power control systems, which requires changes in the technologies of the existing power equipment. With the Smart Grids development the relevance and share of controlled power converter systems used as interfaces between energy sources and the grid, and between grid and the recipients, will grow. High-tech power electronic devices must be used, among other applications, in electric vehicle fast charging stations and in intelligent buildings. This relates to many new challenges for power electronic equipment manufacturers [8]. Among the concepts of using modern power electronic systems

in Smart Grid mentioned in the literature, the concept of replacing conventional 50 Hz distribution transformers with smart distribution transformers deserves special attention [9]. Smart MV/LV distribution transformers are characterised by a compact three-stage design, including:

- input stage in the form of controlled power electronic AC-DC converter on the MV side,
- intermediate stage in the form of DC-DC converter with isolation implemented at high frequency in the range of 20 kHz... 50 kHz
- output stage in the form of controlled power electronic DC-AC converter on the LV side.

A smart distribution transformer of modular design consists of a voltage-specific number of serially connected basic low-voltage functional modules called Power Electronics Building Blocks [10], which can be built of commercially available high-speed semiconductor power devices: transistors and diodes with blocking voltages 1.2 kV or 1.7 kV. A generic diagram of the AC-DC/DC-AC power electronics building block with galvanic isolation of the primary and secondary sides, which enables bi-directional energy flow and voltage adjustment, is shown in fig. 1.

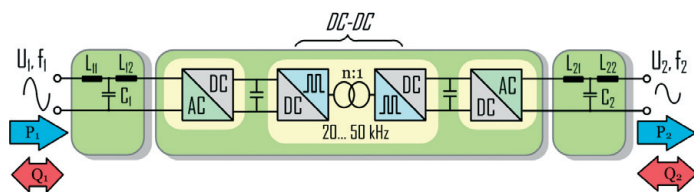


Fig. 1. AC-DC/DC-AC power electronics building block for the application in series per phase on the MV side, and in parallel per phase on the LV side

Another smart transformer design consists in single-phase AC-DC/DC power electronics building block in series on the MV and in parallel on the LV side, that jointly provide a DC circuit on the LV side. Then energy on the LV side is converted by one or more parallel three-phase DC-AC systems with appropriate input power and circuitry. In fig. 2 a concept is shown of a three-stage smart distribution transformer design, made up of a series of single-phase AC-DC/DC modules, and a three-phase four-wire DC-AC inverter on the LV side.

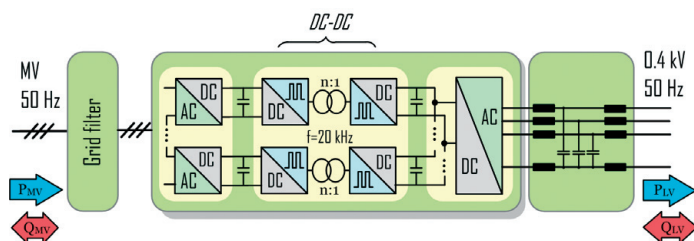


Fig. 2. Concept of three-stage design of smart distribution transformer with modular structure of AC-DC and DC-DC stages and a three-phase DC-AC inverter on the LV side

Active stages: AC-DC on the MV side and DC-AC on the LV side provide the ability to compensate reactive power and shape voltage parameters. Due to its controlled converter systems, a smart distribution transformer can thus be used as the basic actuator in the process of active and reactive power control in distributed generation systems, offering new properties and features [11–15], unprecedented in conventional MV/LV distribution transformers, such as:

- smooth control of supply voltage parameters
- capacity of reactive power compensation
- smooth control of power flow
- balancing of connected systems
- increased resistance to the presence of harmonics in power grid
- capacity of self-regulation in the case of power inflow from connected distributed generation sources.

In addition, with a buffer battery as built-in energy storage, a smart distribution transformer can be directly used, for instance, in fast EV charging systems connected to a MV grid [16], enabling seamless management of demand for power at the point of charging.

Operating frequency of the semiconductor devices in a smart transformer's different AC-DC and DC-AC stages in the order of kHz or tens of kHz allows reducing the size and cost of the passive sinusoidal filters required on the MV and LV sides. Raising the operating frequency of the DC-DC intermediate stage transistors and diodes allows, in turn, significant reduction in the size of the transformer magnetic circuits used in the smart transformer design, compared with the sizes of conventional 50 Hz transformers. Off the shelf availability of semiconductor devices with blocking voltages 1.2 kV or 1.7 kV, including silicon carbide (SiC) high-speed anti-parallel diodes [10], allows reducing the switching losses in individual modules, and achieving a satisfactory smart distribution transformer performance.

It should be noted that fast transistors and diodes, including those of new semiconductor material silicon carbide, for higher blocking voltages in the range of 10 kV [17] and frequencies of tens of kHz, are currently at the development stage of laboratory prototypes. It can be expected that their further development by 2020 will enable designing power electronic devices for an MV grid in a similar way as power electronic converters are now designed for LV grids.

Different topologies of basic functional modules can be found in the literature, as well as different concepts of combining them in the systems of smart MV/LV distribution transformers [9–18]. From a technical point of view, the deployment of smart distribution transformers using currently available high-speed diodes and transistors in MV grids of lowered voltage (3 to 4 kV) is justified, especially in separated pilot systems with RES, MV drives with energy recuperations or vehicle charging stations. The spectrum of processes resulting from changes in the distribution transformer technology, as well as the expected benefits, are so broad that in the coming years they should be verified in separate systems with known parameters, allowing unambiguous assessment of aspects such as reliability, functionality and efficiency. An example may be the pilot system with a smart

3.3 kV/0.41 kV 300 kVA distribution transformer [18] implemented by ABB and Areva at the University of Nottingham as part of the UNIFLEX project.

With the concept of combining functional modules in the structure of a smart transformer, as shown in fig. 2, to the voltage reduced to 3 to 4 kV corresponds the number of three cascaded LV converter modules per phase, which at this stage allows evaluating the device functionality, control dynamics, and suitability for the grid operator with a view to distribution grid code requirements. Only a positive evaluation of the functionality and usability of selected smart transformer topologies in separated lowered voltage grids will substantiate the deployment of full-size devices in 15 kV distribution grids.

## 2. Smart 3.3 kV/0.4 kV distribution transformer model

Fig. 3 presents a diagram of a model of a three-phase smart 3.3 kV/0.4 kV distribution transformer with 180 kVA rated power and three-stage modular design. The AC-DC input stage on the MV side is a three-phase seven-tier voltage inverter with modular design, which in each phase consists of three connected 20 kVA bridge inverters (H-bridge transistors). Each bridge inverter can generate a three-tier AC voltage component on the MV side. During the smart distribution transformer's operation, the capacitors in DC intermediate circuits of each input stage bridge inverter are charged to the same voltage, in accordance with a specific control algorithm.

AC-DC bridge converters in each module are connected with DC-DC DAB – Dual Active Bridge, providing two-way flow of energy. The number of high frequency transformers of the three-phase n-tier converter made up of cascade interconnected H bridges may be determined by relation  $(3(n-1)/2)$ . Secondary sides of all DC-DC converters are connected in parallel to form a common

intermediate DC circuit on the low voltage side. Owing to the 1.5:1 pulse transformer voltage ratios, the blocking voltages of the semiconductor devices used in the DC-DC converters on the LV side may be smaller than on the MV side. Basic parameters of the smart distribution transformer model shown in fig. 3 are presented in tab. 1.

The LV output stage of the smart distribution transformer shown in fig. 3, consists of two three-phase four-leg 90 kVA grid converters. The output stage enables the power supply of end-users and prosumers involved in power generation, three-phase and single-phase alike. Compared to the three-leg inverter with split DC capacitor also providing four-wire power supply, the four-leg inverter delivers twice the voltage between phase and neutral of the three-leg inverter, providing better capabilities of neutral conductor current compensation. The use of two DC-AC inverters connected in parallel on the one hand allows obtaining the required power using commercially available highly efficient 1200 V, 225 A IGBT transistor modules, and on the other hand provides redundancy in the case of failure of one of the inverters. By using the LCL output filter and predictive control methods known from the literature [19], the smart transformer's DC-AC output stage is able to ensure high quality AC voltage parameters. As shown in fig. 3, both the output stage's three-phase four-leg DC-AC inverters can use a common LCL filter [20].

Currently applied methods of three-phase four-leg DC-AC inverter control [19] can ensure flexibility of users' power supply and the ability to generate asymmetrical voltages in individual phases, which, among other benefits, allows for:

- symmetrisation of DC-AC output stage currents
- correction of voltage asymmetry on the LV side
- control of AC voltage positive component without asymmetry correction

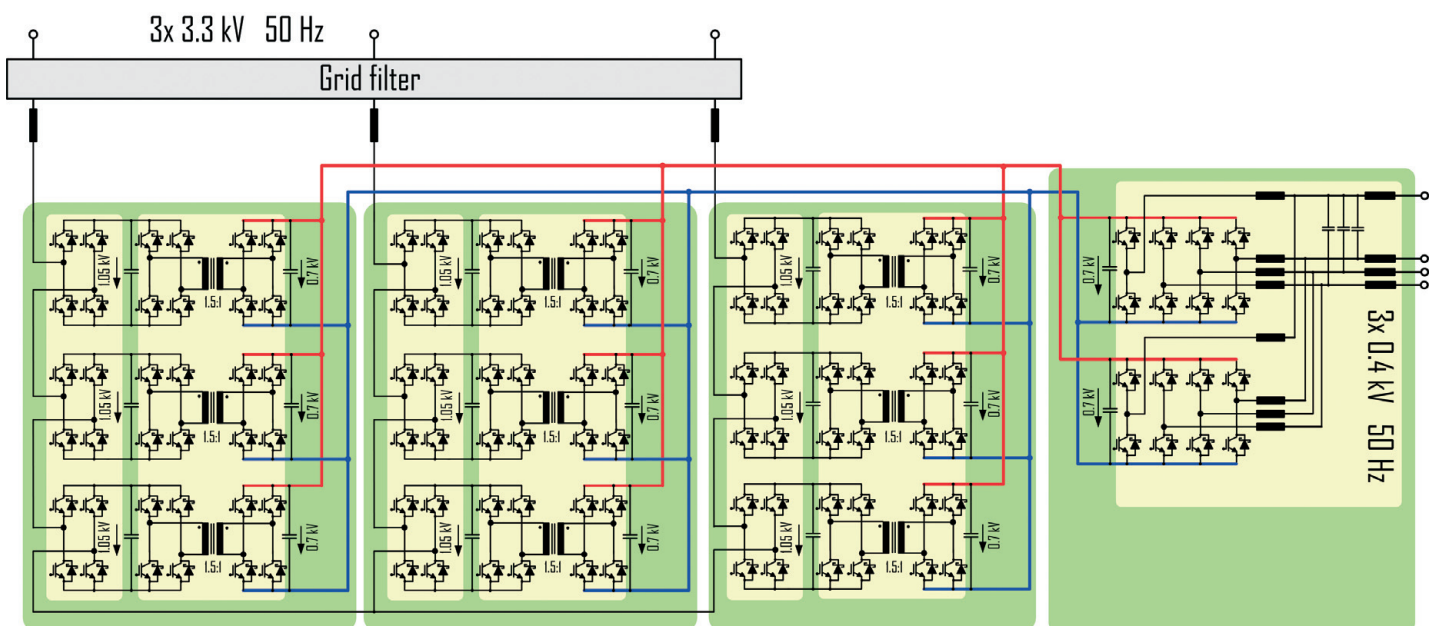


Fig. 3. Diagram of smart 3.3 kV/0.4 kV distribution transformer with three-stage design and 1.5:1 voltage ratio

Number N of modules per phase	Number of MV voltage levels	Power of a single MV module	DC voltage of a single MV module	AC voltage of a single MV module	Blocking voltage and transistor current* on AC MV side	DC voltage of a single LV module	Blocking voltage and DC-DC converter transistor current* on LV side
3	7	20 kVA	1.05 kV	635 V	1.7 kV; 100 A	0.7 kV	1.2 kV; 100 A

\* at model overload capacity assumed at 130%

- elimination of AC voltage negative component resulting from voltage dip.

Modern three-phase four-leg DC-AC grid inverters are able to flexibly cope with most problems of voltage and current asymmetry. The properties of four-leg inverters have not so far been fully used in distributed generation and RES systems in the way in which this can be achieved in a smart distribution transformer.

### 3. Analysis of high frequency isolated DC-DC converter

DC-DC converter with two converter bridges and a high-frequency transformer (dual active bridge) is the key element of a smart distribution transformer, providing galvanic isolation and enabling voltage transformation and bi-directional power flow control. One of the benefits of using high-frequency for voltage transformation is the ability to significantly reduce the transformer's overall dimensions due to the use of modern magnetic materials for its construction, such as amorphous or nanocrystalline cores with adequately high magnetic induction.

Related with the use of modern magnetic cores is an increase in the transistor switching frequencies; in a smart transformer isolation stage it shifts the burden of its design towards accomplishment of the smallest possible switching losses in the DC-DC converter's semiconductor devices. Commercially available silicon carbide (SiC) semiconductor diodes with blocking voltages 1.2 kV and 1.7 kV are characterized by a many times smaller transition charge at switching than ultrafast silicon diodes. Their use and the use of modern methods of so-called ZVS – zero voltage switching allows for isolated DC-DC converter efficiencies above 95%.

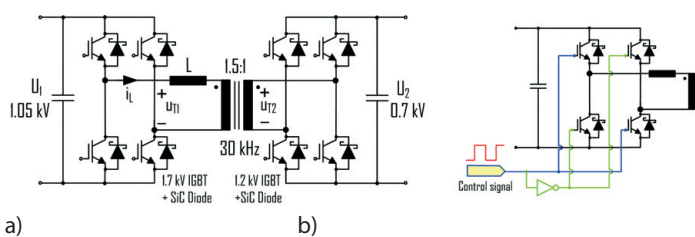


Fig. 4. Dual active bridge DC-DC converter with IGBT transistors and silicon carbide (SiC) anti-parallel diodes (a); separation of IGBT transistors control signal (b)

A diagram of a dual active bridge DC-DC converter with 1.7 kV IGBT transistors on the MV side and 1.2 kV IGBT transistors on the LV side is shown in fig. 4

The task of the two converter bridges of the DC-DC converter (fig. 4a) is the voltage modulation on both sides of the high-frequency transformer. The method of full-bridge isolated DC-DC converter control consists in shifting in time the rectangular control signals relative to each other (fig. 4b) with the bridge converters transistors on the transformer's primary and secondary sides. In the simplest control method, to a certain extent sufficient to control the power transmitted between the converter bridges, both control signals have the same duty cycle  $D = 0.5$ . The transmitted power  $P$  is adjusted by controlling the phase angle  $\phi$  between the control signal on the primary side and the signal of primary side bridge transistors control, according to the following formula:

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

where:  $U_1, U_2$  – voltages on the DC side of the primary and secondary sides' bridges,  $L$  – serially connected inductance for energy storage and reduction of the steepness of current changes in the transformer circuit, and  $f$  – switching frequency of the converter's transistors. Fig. 5 shows results of the analysed converter's simulation, using the method of shifting rectangular control signals with duty cycle  $d = 0.5$ .

The power transmitted between the converter's bridges is non-linearly dependent on the phase shift  $\phi$  between the control

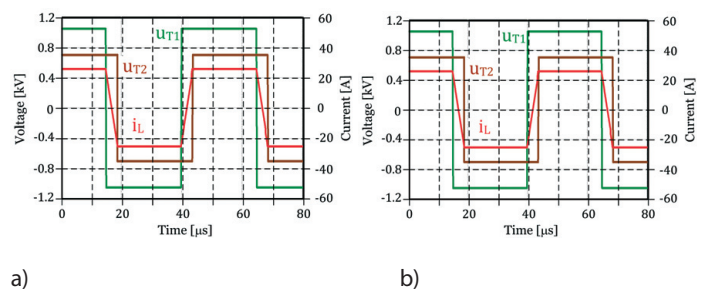


Fig. 5. Simulation waveforms of voltages  $u_{T1}, u_{T2}$  and primary current  $i_L$  at  $U_1 = 1.05$  kV,  $U_2 = 0.7$  kV and power  $P = 20$  kW for case (a):  $f_s = 30$  kHz,  $L = 100$   $\mu$ H and case (b):  $f_s = 20$  kHz,  $L = 150$   $\mu$ H, in open system for the same phase shift  $\phi \approx \frac{\pi}{6}$

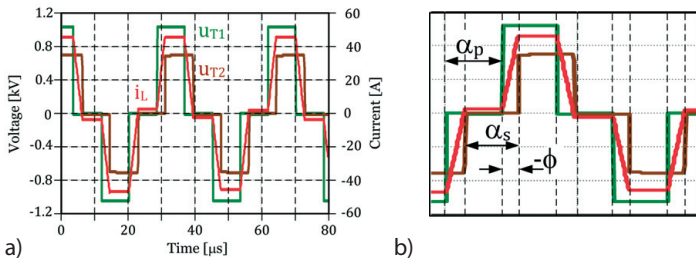


Fig. 6. Simulation waveforms of voltages  $u_{T1}$ ,  $u_{T2}$  and primary current  $i_L$  at  $U_1 = 1.05$  kV,  $U_2 = 0.7$  kV, power  $P = 20$  kW,  $f_s = 30$  kHz and serial inductance  $L = 50$   $\mu$ H (a); phase angle  $\phi$  and angles  $\alpha_p$ ,  $\alpha_s$  of primary and secondary side control signal modulation

signals. For large  $\phi$  values, any further change in the phase angle causes a small change in the DC-DC converter's active power output, while it significantly increases the power internally exchanged between DC capacitors of the primary and secondary sides in the transformer and inductor  $L$ , circuit, thus increasing the  $i_L$  current amplitude. The maximum transmitted power is limited by inductance  $L$  and frequency  $f$  of the transistor switching. The control step, i.e. the minimum phase angle change in the digital control system, depends on the control processor clock frequency and the step of control program execution. The power control rate depends on the actual phase angle  $\phi$ . The bidirectional power flow can be high-rate controlled at low loads. More advanced isolated DC-DC converter control methods allow

power flow regulation, zero-voltage transistor switching (ZVS) over a wide range, and the operation at lower serial inductance  $L$  in the transformer circuit by using – in addition to shifting the control signals relative to each other – also independent adjustment of duty cycles  $D_1$  and  $D_2$  of the signals controlling both the DC-DC converter's bridges. [21]. Simulation waveforms using the method of dual modulation of control signal pulse width (*Dual PWM*) are shown in fig. 6.

Four modes of control of dual active bridge DC-DC converter with double control signal modulation can be distinguished [21]. Modulation angles  $\alpha_p$  of the primary side control signal, and  $\alpha_s$  of the secondary side control signal, may be equal or independently set. For the control mode, the waveforms of which are shown in fig. 6, occurs [21]:

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

A control system of dual active bridge DC-DC converter with dual modulation of control signal pulse width is shown in fig. 7.

Fig. 8 presents simulation results of the transition state of the transformer's secondary current after a step change in DC-DC converter power from 10 kW to 20 kW using dual modulation control.

As can be seen in fig. 8, at serial inductance  $L = 50$   $\mu$ H, the transition state at load change from 50% to the rated power lasts approximately 300  $\mu$ s. The transformer's secondary current amplitude at rated load 75 A results from the transformer ratio 1.5:1.

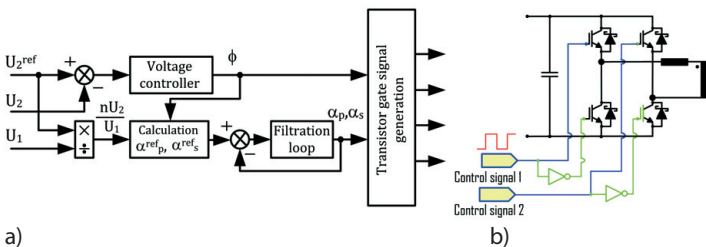


Fig. 7. Control system of dual active bridge DC-DC converter with dual pulse width modulation [21] (a), separation of primary side bridge control signals (b)

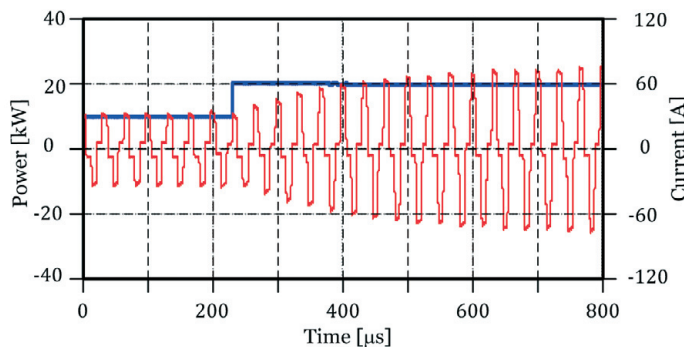


Fig. 8. Transitional state after DC-DC converter power change from 10 kW to 20 kW: secondary transformer current and converter power output waveforms

#### 4. Summary

The three-stage smart distribution transformer solution with modular design presented in this paper is oriented to connecting prosumers as active recipients of electricity with enhanced requirements, and owners of small RES systems and distributed generation sources, providing the possibility of plug & play connection, known so far in computer technology. The smart transformer's intermediate stage, through the use of isolated DC-DC converters with high-speed semiconductor devices, provides the ability to quickly adjust the power flow between the primary and secondary sides.

Under the research grant "Smart MV/LV distribution transformer for Smart Grid with active prosumer participation", conducted by the author at Gdańsk University of Technology in the Department of Mechatronics and High Voltage Engineering, and funded by ENERGA SA Group, theoretical analysis, simulation studies, and laboratory tests of a model of the AC-DC/DC-AC converter module, which is the basic functional unit of the proposed smart distribution transformer of a new generation, are currently in progress. In addition, within the project, methods of communication between the modules, and between the master control system and user interface will be developed.

## REFERENCES

1. Jiyuan F., Borlase S., The evolution of distribution, *IEEE Power and Energy Magazine* 2009, Vol. 7, No. 2, pp. 63–68.
2. Ipakchi A., Albuyeh F., Grid of the future. *IEEE Power and Energy Magazine* 2009, Vol. 7, No. 2, pp. 52–62.
3. 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>.
4. The German Roadmap. E-Energy / Smart Grid. German Commission for Electrical, Electronic & Information Technologies of DIN and VDE.
5. EDISON Project Report, [on-line]: [http://www.edison-net.dk/Dissemination/ Reports.aspx](http://www.edison-net.dk/Dissemination/Reports.aspx).
6. 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, pp. 1–8.
7. Czyżewski R., Babś A., Madajewski K., Smart Grids – selected objectives and directions of distribution system operator actions, *Acta Energetica* 2012, Issue 8, pp. 31–35.
8. Adamowicz M. i in., Sterowanie rozdziałem energii w układach przekształtnikowych pojazdów elektrycznych i źródeł odnawialnych, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 2012, Issue 4b, pp. 7–12.
9. Wang J., Huang A. Q., Sung W., Liu Y., Baliga B. J., Smart Grid Technologies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, June 2009, pp. 16–23.
10. Adamowicz M., Krzemiński 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, pp. 1–6.
11. Wang D. et al., Theory and application of a distribution electronic power transformer, *Electric Power System Research* 2009, Vol. 77, pp. 219–226.
12. 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, pp. 2457–2464.
13. 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, pp. 1031–1038.
14. Research on Voltage and Power Balance Control for Cascaded Modular Solid-State Transformer, *IEEE Transactions On Power Electronics* 2011, Vol. 26, No. 4, pp. 1154–1166.
15. Lu X. et al., Talk to Transformers: An Empirical Study of Device Communications for the FREEDM System, Proc. IEEE Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011, pp. 303–308.
16. Hõimoja 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.
17. 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, pp. 2689–2692.
18. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 1215–1227.

## Publication of post-contest

The paper was awarded first prize in ENERGA SA's competition for a research grant.

## Marek Adamowicz

Gdańsk University of Technology  
 e-mail: [madamowi@ely.pg.gda.pl](mailto:madamowi@ely.pg.gda.pl)

An assistant professor in the Department of Mechatronics and High Voltage Engineering of Gdańsk University of Technology. Former manager of the LIDER project on AC/AC converters made up of silicon carbide semiconductor devices for wind turbines in the first program for the development of young researchers of the National Centre for Research and Development (2010–2012). His scientific interests include: development of new converter systems for MV distribution grids, control methods of wind turbines and MV electric drives with bidirectional power flows.

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

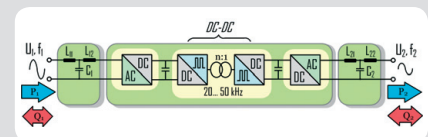
w wytwarzaniu energii będą aktywnie uczestniczyć w procesie zarządzania pikiem obciążenia w systemie, udostępniając magazyny energii w swoich pojazdach elektrycznych, w ramach tzw. infrastruktury *vehicle-to-grid* (V2G). W Danii rozwój infrastruktury V2G jest ściśle powiązany z dalszym rozwojem energetyki 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.

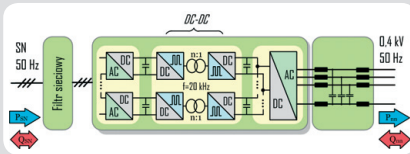
Inteligentny transformator dystrybucyjny o budowie modułowej składa się z określonej, w zależności od wartości napięcia, liczby połączonych szeregowo podstawowych niskonapięciowych modułów funkcjonalnych (ang. *Power Electronics Building Blocks*) [10], które mogą być konstruowane z dostępnych na rynku 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:

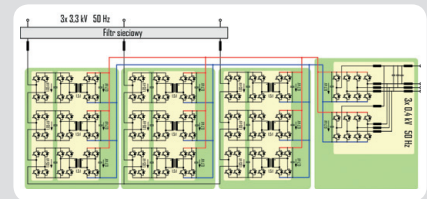
- płynna regulacja parametrów napięcia zasilającego
- zdolność kompensacji mocy biernej
- płynna regulacja przepływu mocy
- balansowanie systemów połączonych
- zwiększona odporność na występowanie wyższych harmonicznych w sieci energetycznej
- zdolność samoregulacji w przypadku przepływu mocy dołączonych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

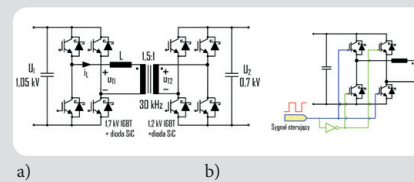
Nowoczesne trójfazowe 4-gałęziowe przekształtniki sieciowe DC-AC są w stanie w elastyczny sposób radzić sobie z większością problemów związanych z niesymetrią napięć i prądów. Dotychczas właściwości przekształtników 4-gałęziowych nie były w pełni wykorzystywane w układach generacji rozproszonej i OZE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



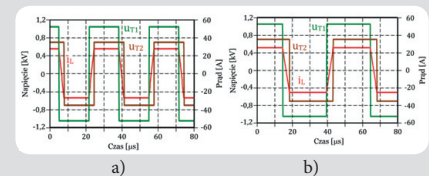
Rys. 4. Sterowana przetwornica izolowana DC-DC z tranzystorami IGBT i diodami zwrotnymi z węgla krzemu (SiC) (a); sposób rozdzielenia sygnału sterującego tranzystorami mostka (b)

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  $\phi$  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  $d = 0,5$ .

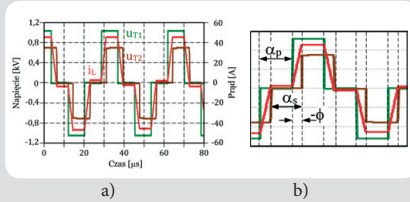


Rys. 5. Przebiegi symulacyjne napięć  $u_{T1}, u_{T2}$  oraz prądu strony pierwotnej  $i_{T1}$  przy  $U_1 = 1,05$  kV,  $U_2 = 0,7$  kV oraz mocy  $P = 20$  kW dla przypadku (a):  $f_s = 30$  kHz,  $L = 100$   $\mu$ H oraz przypadku (b):  $f_s = 20$  kHz,  $L = 150$   $\mu$ H, w układzie otwartym dla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

Wartość mocy przesyłanej pomiędzy mostkami przetwornicy zależy nieliniowo od przesunięcia fazowego  $\phi$  sygnałów sterujących. Przy dużych wartościach  $\phi$  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  $\phi$ . 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-

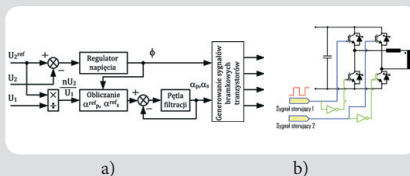


Rys. 6. Przebiegi symulacyjne napięć  $u_{T1}$ ,  $u_{T2}$  oraz prądu strony pierwotnej  $i_1$  przy  $U_1 = 1,05$  kV,  $U_2 = 0,7$  kV, mocy  $P = 20$  kW,  $f_s = 30$  kHz oraz indukcyjności szeregowej  $L = 50$   $\mu$ H (a); kąt przesunięcia fazowego  $\phi$  oraz kąty  $\alpha_p$ ,  $\alpha_s$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

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

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

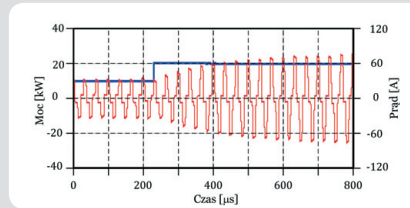
Układ sterowania izolowaną przetwornicą DC-DC z podwójną modulacją szerokości impulsów sygnałów sterujących został pokazany na rys. 7.



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  $L = 50$   $\mu$ H, czas trwania stanu przejściowego przy zmianie obciążenia z 50% do wartości znamionowej mocy wynosi ok. 300  $\mu$ 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., Babć 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.ee.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.