

Application of Voltage-regulating and Phaseshifting Transformers to Control Power Flows in the Power System

Authors

Maksymilian Przygodzki
Piotr Rzepka
Mateusz Szablicki

Keywords

active and reactive power flow, regulating transformer, voltage-magnitude-regulating, phase-angle-regulating

Abstract

Transmission system performance results from, among other factors, the use of devices for electricity transmission and transformation. Proper operation and control of these devices allows maintaining proper electricity parameters and the continuous supply to end consumers. In the group of electricity transforming devices transformers can be distinguished by the ability to control both the magnitude and phase angle of voltage. In this way transmission system state parameters are adjusted, which enable selecting the reactive and active power. On the one hand, these are devices of a complex structure, resulting in difficult operating conditions, while on the other hand they provide a potential opportunity to influence the power flow (including active power) in power grids. This article presents the idea of voltage and phase regulation and a transformer regulating unit model. Using the transformer unit's grid model power analyses were conducted with a focus on evaluating load flow control capabilities. The results of the calculations for the selected transformer unit are presented.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015408

The idea of phase angle voltage control by transformers

Stable operation of the power system requires continuous adjustment of various electrical parameters. For example, the distribution of power can be changed by changing grid node voltages and/or their angle differences. The node voltage angle differences adjustment represents significant active power flow control potential. Such control can not only change the power, but also its flow direction. It should be noted that the active power control by way of node voltages (voltage magnitude) regulating is relatively ineffective. Active power flows are weakly correlated with the voltage maintained in the node. It is different with reactive power control, where even small changes in the node voltage have a major impact on the reactive power flow. One of the primary devices used to adjust power parameters is a transformer or a set of transformers with adjustable voltage

ratios. Adjustments are made by changing the tap changer position. This results in a step change in the transformer/set of transformers voltage ratio. In high power transformers the adjustment is performed without disconnecting the transformer from the grid, i.e. on load. Transformers provided with systems for on load voltage ratio control are often called regulating transformers, since by means of appropriate changes in their voltage ratios the regulation process can be carried out. The types of regulation available through the application of a regulating transformer depend on the transformer's/sets of transformer's structural features (and its role in the power grid). In practice, the grid regulating transformers can be used in the process of control of: voltage, reactive power and active power.

A simplified functional diagram of the regulation provided by a regulating transformer is shown in Fig. 1 [1]. While the grid operating condition is changed [in Fig. 1 the operating condition

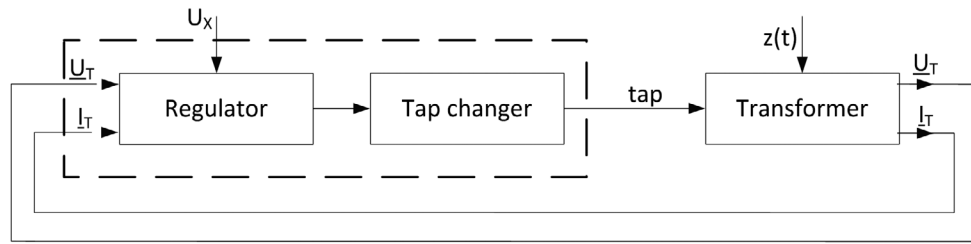


Fig. 1. Functional diagram of transformer voltage ratio control system

is mapped by signal $z(t)$], the regulator drives the regulating transformer's tap changer thus changing its voltage ratio. This change should match the present change in the grid's operating conditions. The regulator generates the decisions appropriate for the grid's "new" operating conditions based on voltage U_T and current I_T measured on the selected side of the transformer, making of them a measurement value, which is compared with the setpoint, and generates the appropriate control signal which executes the predetermined control algorithm.

Regulators in some power transformers may also receive additional, external control signals U_x , for example from the master controller executing area tasks.

Types of adjustments by means of regulating transformers

The following adjustment types can be implemented by regulating transformers:

- voltage-magnitude-regulating
- phase-angle-regulating
- voltage magnitude and phase angle (complex) regulating.

Types of adjustments that can be implemented by a transformer/set of transformers depend on its design features [2]. In terms of design, regulating transformers may vary by the number of taps, their location and design, the number of transformers in the set, and their connection within it.

Fig. 2 shows an example of the schematic diagrams of regulating transformers for phase angle regulating. These transformers are usually made in the form of a set of transformers consisting of main unit (JG) and booster unit (JD). The main unit is a transformer (or auto-transformer) coupling grids with different rated voltages. The booster unit, depending on its design, may consist

of one or two transformers: booster transformer (TD) and excitation transformer (TW).

The booster units' basic device (transformer) is booster transformer TD. The transformer is primarily responsible for the regulating of the phase angle between the voltages on the whole unit's both ends [3]. The windings of the booster transformer's individual phases on the upper voltage side are not connected in a star or delta. They are integrated into the transmission system in series. The lower voltage windings can be powered with phase or phase-to-phase voltages from the excitation transformer TW or directly from the main unit's third winding. The role of excitation transformer TW is to power booster transformer TD with voltage with appropriate magnitude, phase angle and phase sequence. Also the main unit's third winding may act as excitation transformer (Fig. 2a). However, providing booster unit with an excitation transformer (Fig. 2b) is operationally more convenient – e.g. in case of damage of the tap changer or booster transformer, transformers TD and TW can be "bridged". This will enable the operability of the transformer set then made up of the main unit only, while the damaged devices can be repaired without a long-term interruption in the transformer substation operation. An example diagram of 3-phase wiring of excitation transformer and booster transformer is shown in Fig. 3.

The main control types implemented by the booster unit are shown with phasor diagrams in Fig. 4 [1]. Voltage inputs to each phase of the transmission system from the booster transformer ($\Delta U_A', \Delta U_B', \Delta U_C'$) are proportional to the voltages powering its primary windings (Fig. 4a). The phasor diagrams of phase and phase-to-phase voltage vectors (Fig. 4b) show that the phase voltages vectors are offset by $\pi/2$ from the adjacent phase-to-phase voltage vectors. This feature exploited in the booster or excitation transformer's supply enables the voltage phase displacement ΔU (Fig. 4d).

Where the booster transformer is powered by an excitation transformer with phase voltages of a constant phase sequence (U_A, U_B, U_C) the booster voltages are obtained in the form of: $\Delta U_A' = \beta U_A$, $\Delta U_B' = \beta U_B$, $\Delta U_C' = \beta U_C$, where β is the resulting voltage ratio of the excitation and booster transformers. Then (Fig. 4c) the vectors of voltages U_A', U_B', U_C' at the output of the booster unit's serial winding are in phase with the vectors of voltages U_A, U_B, U_C powering (at the serial winding input) the booster unit. In this case, the transformer set controls only the voltage magnitude in the transmission system (the voltage phase angle remains unchanged). This type of control is voltage-magnitude-regulating.

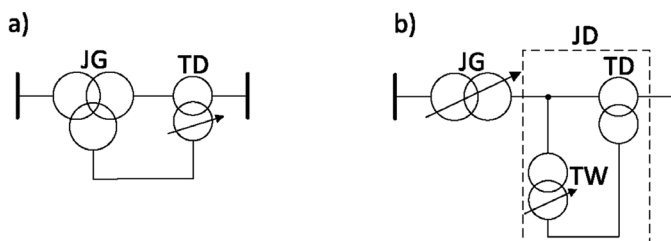


Fig. 2. Examples of regulating transformer schematic diagrams:

- a) booster transformer powered by main unit's third winding;
b) booster transformer powered by excitation transformer

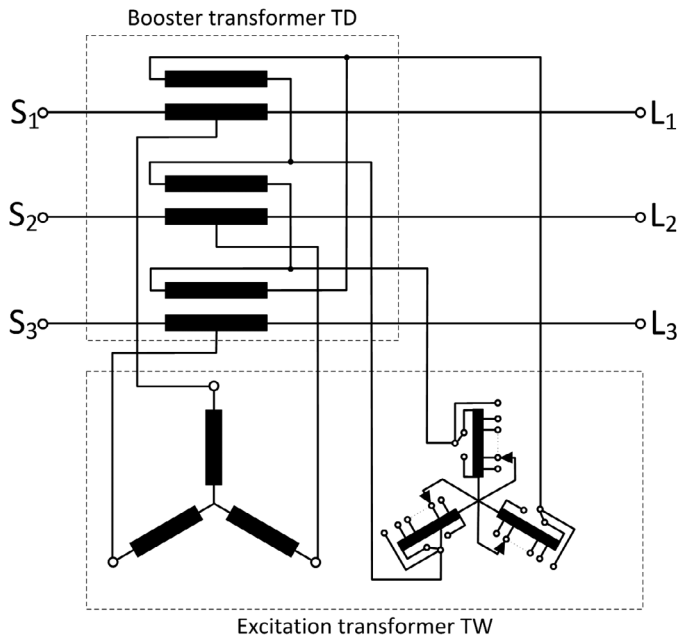


Fig. 3. Wiring diagram of regulating transformer's booster unit

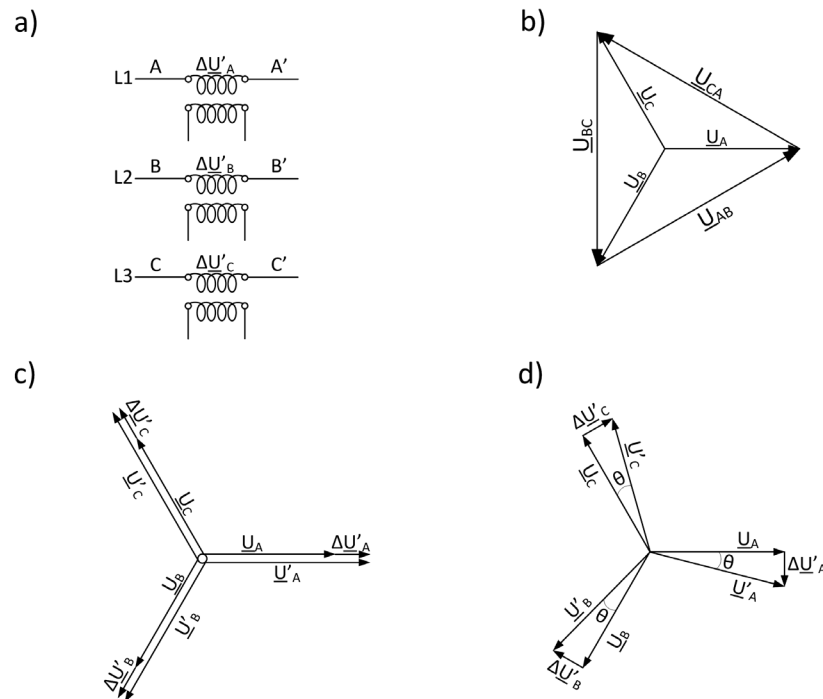
This control effect of a transformer set is equivalent to that provided by conventional transformers and autotransformers by way of tap-changing that alters the transformer's voltage ratio, and thus the winding voltage.

Another control effect (phase-angle-regulating) is obtained where the lower voltage side of the booster transformer is powered with adjacent phase-to-phase voltages (or phase voltages with altered phase sequence). In this case, booster voltage is obtained in the form of: $\Delta U_{A'}' = \gamma U_{BC}$, $\Delta U_{B'}' = \gamma U_{CA}$, $\Delta U_{C'}' = \gamma U_{AB}$, where γ is the resulting voltage ratio of the excitation and booster transformers. The vectors of these voltages are shifted in phase by $\pi/2$ from the vectors of voltages U_A , U_B , U_C upstream of the booster unit ($\pi/2$ angle is obtained in the case of the booster transformer' powered with the adjacent phase-to-phase voltages; where it is powered by phase voltages with an altered phase sequence the angle depends on the phase sequence).

This shifts by angle θ the phase of the vectors of voltages $U_{A'}$, $U_{B'}$, $U_{C'}$ at the output of the booster unit's serial winding from the vectors of voltages U_A , U_B , U_C at the its input. It should be noted that angle θ depends on the magnitudes of the vectors of booster voltages $\Delta U_{A'}$, $\Delta U_{B'}$, $\Delta U_{C'}$. Thus, the change in the booster voltage vector magnitudes enables the vector phase angle control downstream of the transformer set. This control type is called phase-angle-regulating.

Complex (voltage-regulating and phase-shifting) control is the combination of voltage-magnitude and phase-angle regulating. This type of control can be implemented in two ways [4]:

- separately (independent voltage-regulating and phase-shifting) – in this case the voltage-magnitude regulating is



U_A , U_B , U_C – vectors of voltages at the input of the serial winding of booster unit
 $U_{A'}$, $U_{B'}$, $U_{C'}$ – vectors of voltages at the output of the serial winding of booster unit
 $\Delta U_{A'}$, $\Delta U_{B'}$, $\Delta U_{C'}$ – vectors of booster voltages

Fig. 4. The idea of control by transformer set: a) booster transformer winding; b) phase voltages and phase-to-phase voltages at booster unit input; c) and d) phase voltages at booster unit output (Fig. c – for voltage magnitude control; Fig. d – for voltage angle control)

usually provided by the transformer set's main unit, while the phase-angle regulating is provided by its booster unit; both these types of control can be performed independently (i.e. control of a voltage parameter, either magnitude or phase angle, does not affect the other parameter)

- jointly (interdependent voltage-regulating and phase-shifting) – voltage-magnitude and phase-angle regulating are provided by the booster unit; both these adjustment are interdependent (i.e. control of a voltage parameter, either magnitude or phase angle, alters the other parameter); such joint voltage and phase-shifting control is usually called complex.

In Fig. 5. these regulation types are matched with power devices, which enable the voltage-regulating, phase-angle regulating, and complex control. Devices for voltage-regulating (voltage magnitude control) are transformers and autotransformers with adjustable taps. Best suited for the phase-angle regulating (voltage phase angle control) only are so called phase shifters (phase shifter transformer). The complex regulation (voltage magnitude and phase angle control) is provided by regulating transformers in the form of transformer sets consisting of a main unit and a booster unit.

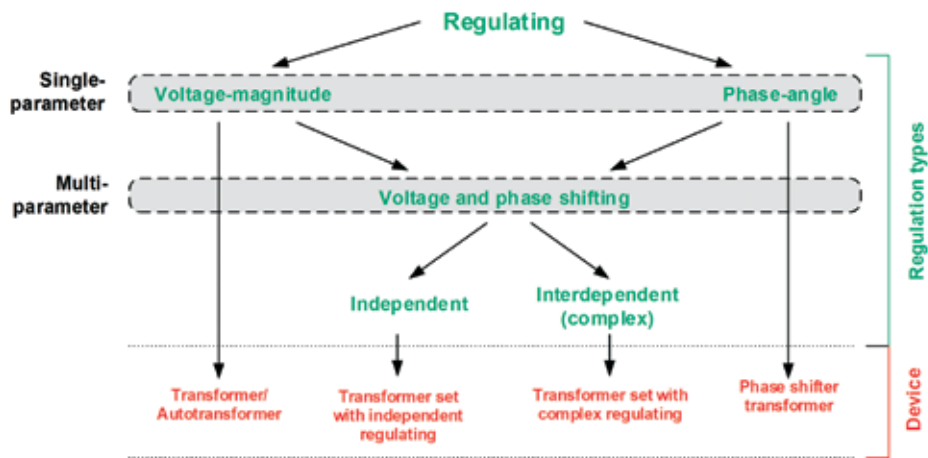
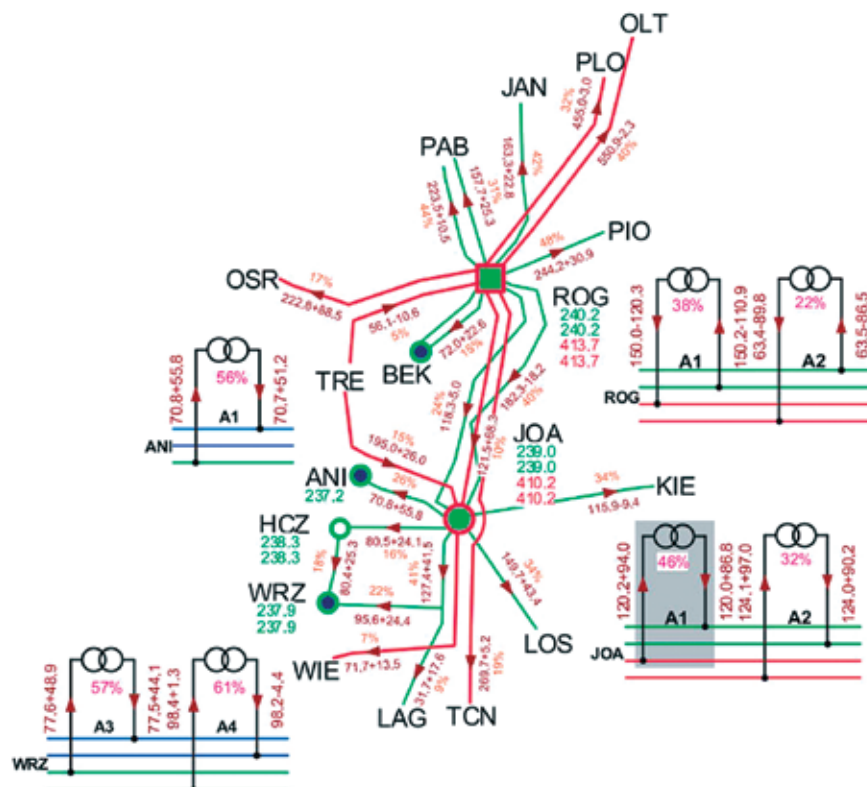


Fig. 5. Regulation types and transformer units that enable them



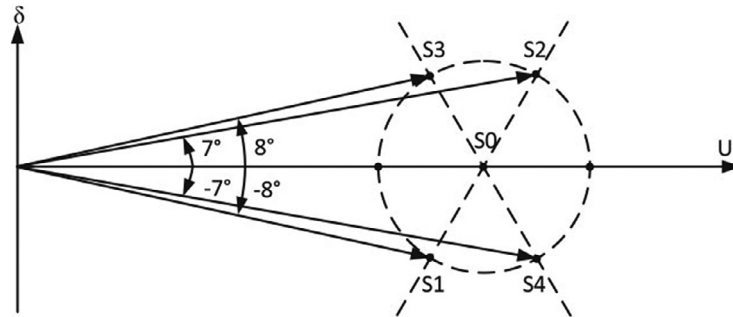


Fig. 7. Control parameter setting scenarios of transformer with interdependent voltage and phase-shifting (complex) regulating capability

Effects of control by transformer sets

In considering the merits of the regulation provided by transformer sets with voltage and phase-shifting capability its grid effects were analysed. For this purpose regulating transformer models were so parameterised as to reflect real systems. The analysis included a model of a transformer set with dependent complex regulation. The model of such a set was defined as a single power object representing the main unit and the booster unit of an actual transformer set.

The transformer sets performance was analysed in a closed 400 kV and 220 kV grids of the National Power System (NPS). Subject to the analysis was a grid system, the structure of which and the set of grid elements reflects the NPS' actual condition at the winter peak load. The reference was a baseline system without complex regulation (with neutral tap setting) herein-after referred to as baseline scenario S0. The calculations focused on active power flows through NPS elements. Fig. 6 shows the power flow in the immediate grid vicinity of the substation with the regulating transformer (the transformer is marked with greyed background). Selected for the analysis was the transformer designated as A1 in Joachimów node. To examine the effects of the operation of a transformer set with complex regulation capability the following four operational scenarios were analysed (Fig. 7):

scenario S1: regulating angle $\alpha = -120^\circ$, tap 1

scenario S2: regulating angle $\alpha = -120^\circ$, tap 19

scenario S3: regulating angle $\alpha = 120^\circ$, tap 1

scenario S4: regulating angle $\alpha = 120^\circ$, tap 19.

Analysing the results, the changes were calculated in the active power flows resulting from the various scenarios of transformers control parameters setting.

The monitored parameter changes were related to respective parameter values in baseline scenario S0 (base system) in accordance with equations (1) and (2):

$$\Delta P_T = \frac{P_T^{Sx} - P_T^{S0}}{P_T^{S0}} \quad (1)$$

where:

P_T^{S0} – active power flow in transformer in scenario S0

P_T^{Sx} – active power flow in transformer in scenario S_x ($x = 1 \dots 4$)

$$\Delta \beta = \beta^{Sx} - \beta^{S0} \quad (2)$$

where:

β^{S0} – transformer load in scenario S0

β^{Sx} – transformer load in scenario S_x

The following table shows the power flows and loads, as well as their changes resulted from changes in JOA-A1 transformer settings (various scenarios).

Fig. 8 shows the relationship between the number of grid elements subjected to the operating condition changes (in terms of power flow) resulting from various control setting scenarios of the analysed transformer set with voltage and phase-shifting regulating capability and the power flow changes. The chart takes into account only the items for which the change exceeded 10%.

In addition to the power flow analysis in normal conditions, a variant analysis was performed taking into account grid element outages. The calculations included regulation scenarios S1 and S2 and baseline scenario S0. To analyse the impact of the voltage and phase-shifting regulating by means of JOA-A1 400/220 kV transformer, the following grid operation options were considered:

W0 – normal (base) system

W1 – Joachimów – Huta Częstochowa 220 kV line outage

W2 – Płock – Rogowiec 400 kV line outage, and Rogowiec – Ołtarzew 400 kV line outage.

Parameter		Parameter values depending on scenario of transformer control parameters setting				
Scenario		S0	S1	S2	S3	S4
P_T	MW	120.2	-255.9	411.4	496.7	-175.1
β	%	46.0	83.0	158.0	156.0	109.0
Scenario		–	S1-S0	S2-S0	S3-S0	S4-S0
ΔP_T	%	–	-312.8	242.1	313.0	-245.6
$\Delta \beta$	%	–	37.0	112.0	110.0	63.0

Tab. 1. Active power flows in and load steps of JOA-A1 transformer, and their changes in various scenarios of its control parameters setting

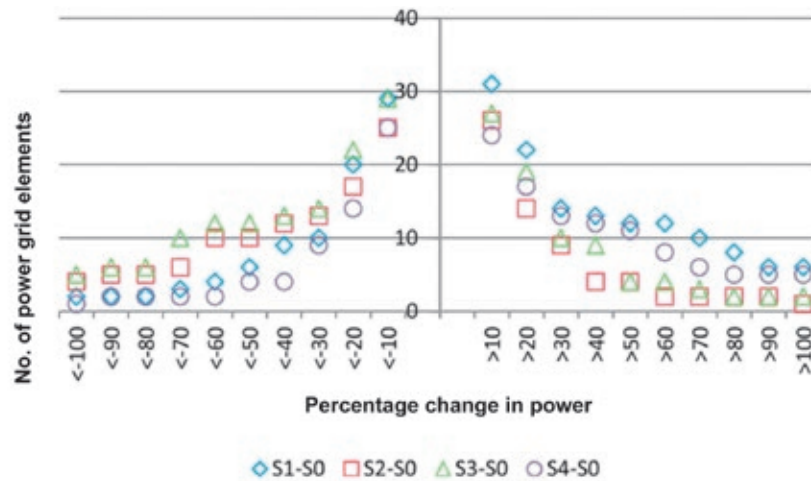


Fig. 8. Relationship between number of NPS elements and direction and range of power flow changes in various scenarios of JOA-A1 transformer's control parameters setting

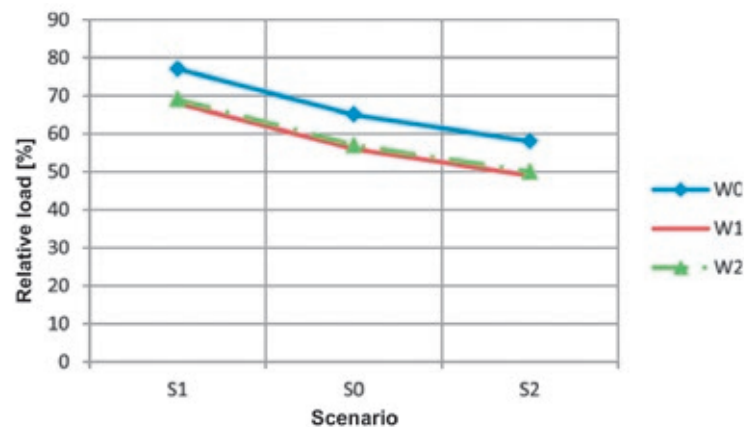


Fig. 9. Changes in load of Joachimów – Rogowiec 220 kV line in various NPS operating options and scenarios of regulating transformer's control parameters setting

Fig. 9 shows the changes in the load of a selected line (Joachimów – Rogowiec 220 kV line) as a function of JOA-A1 transformer's control parameter settings.

Summary

- Implementation of phase-angle-regulating by transformer sets with voltage and phase-shifting regulating capability allows controlling the active power flows through these transformers, and – therefore – the power distribution in their locations' grid areas in the NPS, in particular this applies to 400 kV and 220 kV grids. The basic effect of this regulation relates to the power flow (load) of the transformer set.
- Power flow control capabilities of the analysed regulating transformers depend on their design features (range of changes in angle ratio δ , equivalent impedance, etc.) and their locations in the NPS (incl. short-circuit power and the grid environment structure on both sides of the transformer). It is advisable to apply this regulating solution for load sharing between 220 kV and 400 kV lines.

- In a transformer with interdependent voltage and phase-shifting regulating capability a change in the angle ratio δ entails a change in the voltage ratio (for regulating angle α different than 0°). Then, concurrently with a change in node voltages' phase shift angles, their magnitudes are changing. This interdependence is disadvantageous, because it limits the capability of unrestricted control of the grid conditions. In particular, it may apply to NPS emergency operating conditions.
- In transformer sets with interdependent voltage and phase-shifting regulating capability installed in the NPS a change in regulating angle α requires not only switching the entire transformer set off, but also altering the sequence of phase-to-phase connections between its individual units. This precludes quick control of power flows in NPS emergencies requiring immediate response. It should be therefore assumed that for this type of transformer set the uninterrupted operation is determined by the structure of the connections between the main unit and booster unit.

REFERENCES

1. J. Machowski, "Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego" [Power system's regulation and stability] Warsaw University of Technology Publishers, Warszawa 2007.
 2. S. Ziemianek, "Zespoły transformatorowe z regulacją przekładni poprzecznej jako sieciowe środki kształtowania przepływów mocy (energii) w SEE" [Transformer sets with adjustable phase-shifter ratio as grid means of power (energy) flows in the power system], *Wiadomości Elektrotechniczne*, No. 12, 2006.
 3. R. Korab, R. Owczarek, "Kształtowanie transgranicznych przepływów mocy z wykorzystaniem transformatorów z regulacją poprzeczną" [Control of cross-border power flows by transformers with phase-shifter regulating capability], *Energetyka*, No. 5, 2011.
 4. K. Żmuda, "Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze – wybrane zagadnienia z przykładami" [Power transmission and distribution systems – selected issues with examples], Silesian University of Technology Publishers, Gliwice, 2012.
-

Maksymilian Przygodzki

PSE Innowacje sp. z o.o. / Silesian University of Technology

e-mail: maksymilian.przygodzki@pse.pl

Assistant professor at the Institute of Power Engineering and Control Systems of the Silesian University of Technology in Gliwice, an expert in PSE Innovations sp. z o.o. He studies issues related to power grid operation, in particular in the long-term horizon, and issues related to distributed power engineering.

Piotr Rzepka

PSE Innowacje sp. z o.o. / Silesian University of Technology

e-mail: piotr.rzepka@pse.pl

Assistant professor at the Institute of Power Engineering and Control Systems of Silesian University of Technology in Gliwice, chief consultant in PSE Innovations sp. z o.o. He studies issues related to modelling of disturbance conditions in the power system, operation of power automation systems (incl. system automation and automatic protections), and determination of the impact of distributed sources on the performance of power automation systems.

Mateusz Szablicki

PSE Innowacje sp. z o.o. / Silesian University of Technology

e-mail: mateusz.szablicki@pse.pl

Assistant researcher/lecturer at the Institute of Power Engineering and Control Systems of Silesian University of Technology in Gliwice, chief consultant in PSE Innovations sp. z o.o. He studies issues associated with power systems automation for grids with complex functionalities and configurations (incl. multi-agent systems, synchronous measurements, smart grids), and modelling and simulation of the operating conditions of electric power facilities (particularly of electromagnetic transients).

Wykorzystanie transformatorów z regulacją skośną do sterowania przepływami mocy w systemie elektroenergetycznym

Autorzy

Maksymilian Przygodzki
Piotr Rzepka
Mateusz Szablicki

Słowa kluczowe

rozpływ mocy, zespół transformatorowy, regulacja wzdłużno-poprzeczna

Streszczenie

Funkcjonowanie systemu przesyłowego jest wynikiem wykorzystywania pracy m.in. urządzeń służących do przesyłu, jak i transformacji energii elektrycznej. Prawidłowa eksploatacja i sterowanie tymi urządzeniami pozwala na zachowanie właściwych parametrów energii elektrycznej oraz ciągłości zasilania odbiorców końcowych. W grupie urządzeń pozwalających na transformację energii elektrycznej można wyróżnić transformatory z regulacją, które mają możliwość kształtowania zarówno poziomu, jak i kąta napięcia. W ten sposób regulowane są parametry stanu układów przesyłowych pozwalające na dobór przesyłanych wielkości mocy biernej oraz czynnej. Z jednej strony układy te są urządzeniami o skomplikowanej budowie, co wpływa na utrudnione warunki ich eksploatacji, ale jednocześnie z drugiej strony dają one potencjalnie możliwość wpływu na rozpływy mocy (w tym mocy czynnej) w sieciach elektroenergetycznych. W artykule przedstawiono ideę regulacji wzdłużno-poprzecznej oraz model zespołu transformatorowego. Wykorzystując model sieciowy zespołu transformatorowego, przeprowadzono analizy sieciowe skupione na ocenie możliwości sterowania przepływem mocy. Dla wybranego zespołu transformatorowego przedstawiono wyniki wykonanych obliczeń.

Idea regulacji wzdłużno-poprzecznej realizowanej za pomocą transformatorów

Stabilna praca systemu elektroenergetycznego wymaga ciągłej regulacji różnych wielkości elektrycznych. Przykładowo rozpływ mocy można zmieniać, dokonując zmian wartości napięć węzłowych sieci czy różnicy kątów tych napięć. Duże możliwości regulacji przesyłu mocy czynnej daje zmiana różnicy kątów napięć węzłowych. Sterowanie takie umożliwia nie tylko zmianę wartości mocy, ale również kierunku przepływu. Należy przy tym zauważyć, że możliwość sterowania mocą czynną przy wykorzystaniu regulacji wartości napięć węzłowych (modułów napięć) jest stosunkowo mało efektywna. Występuje tu słabe powiązanie przepływów mocy czynnej z poziomem napięcia utrzymywanym w węźle. Sytuacja ta jest odmienna dla sterowania mocą bierną, gdzie nawet małe zmiany wartości napięć węzłowych mają duży wpływ na przepływy mocy biernej.

Jednym z podstawowych urządzeń wykorzystywanych do regulacji parametrów energii jest transformator lub zespół transformatorowy z regulacją przekładni. Regulacji dokonuje się, zmieniając położenie przełącznika zaczepów. Daje to skokową zmianę przekładni transformatora/zespołu transformatorowego. W transformatorach dużych mocy regulację przeprowadza się bez odłączenia transformatora od sieci, czyli pod obciążeniem. Transformatory wyposażone w układy do zmiany przekładni pod obciążeniem nazywa się często transformatorami regulacyjnymi, ponieważ za pomocą odpowiednich zmian przekładni tych transformatorów można prowadzić proces regulacji. Rodzaje regulacji, jakie mogą być realizowane za pomocą transformatora regulacyjnego, zależą m.in. od właściwości konstrukcyjnych transformatora/zespołu transformatorowego (oraz jego roli w sieci

elektroenergetycznej). W praktyce sieciowe transformatory regulacyjne mogą być wykorzystywane w procesie regulacji: napięcia, mocy biernej, a także mocy czynnej.

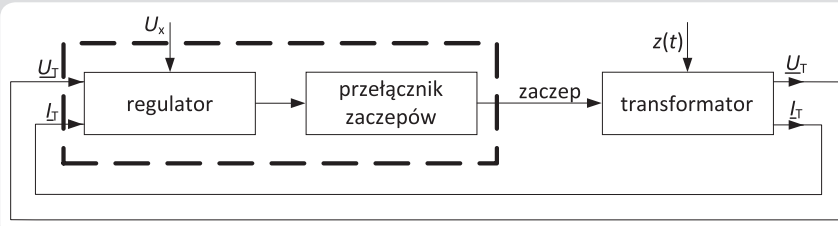
Uproszczony schemat funkcjonalny regulacji, realizowanej za pomocą transformatora regulacyjnego, przedstawiono na rys. 1 [1]. Podczas zmian stanu pracy sieci [na rys. 1 stan pracy odwzorowuje sygnał $z(t)$] regulator oddziałuje na przełącznik zaczepów transformatora regulacyjnego, wywołując zmianę jego przekładni. Zmiana ta powinna być odpowiednia do występującej zmiany stanu pracy sieci. Regulator wypracowuje decyzje właściwe dla „nowych” warunków pracy sieci na podstawie pomiaru napięcia U_T oraz prądu I_T po wybranej stronie transformatora, tworząc z nich wielkość pomiarową, którą porównuje z wartością zadaną i wypracowuje odpowiedni sygnał regulacyjny oraz realizuje zadany algorytm regulacji. Regulatory w niektórych transformatorach energetycznych mogą otrzymywać również dodatkowe sygnały sterujące U_x z zewnątrz, na przykład z regulatora nadrzędnego realizującego zadania obszarowe.

Rodzaje regulacji realizowanej za pomocą transformatorów regulacyjnych

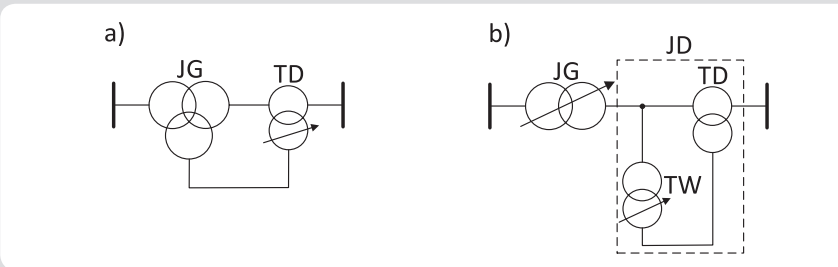
Za pomocą transformatorów regulacyjnych można realizować następujące rodzaje regulacji:

- regulację wzdłużną
 - regulację poprzeczną
 - regulację wzdłużno-poprzeczną (skośną).
- Rodzaje regulacji, jakie mogą być realizowane za pomocą danego transformatora/zespołu transformatorowego, zależą m.in. od jego cech konstrukcyjnych [2]. Pod względem konstrukcyjnym transformatory regulacyjne mogą różnić się m.in. liczbą zaczepów, miejscem lokalizacji oraz sposobem wykonania przełącznika

zaczepów, liczbą transformatorów wchodzących w skład zespołu transformatorowego, sposobem połączenia tych transformatorów. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe schematy ideowe transformatorów regulacyjnych umożliwiających regulację wzdłużno-poprzeczną. Transformatory te najczęściej są wykonane w postaci zespołów transformatorowych składających się z jednostki głównej (JG) i jednostki dodawczej (JD). Jednostka główna to transformator (lub autotransformator) sprzęgający sieci o różnych wartościach napięć znamionowych. Natomiast jednostka dodawcza, w zależności od wykonania, może się składać z jednego lub dwóch transformatorów: transformatora dodawczego (TD) i transformatora wzbudającego (TW). Podstawowym urządzeniem (transformatorem) jednostki dodawczej jest transformator dodawczy TD. Transformator ten jest w głównej mierze odpowiedzialny za regulację kąta przesunięcia fazowego pomiędzy napięciami występującymi na obydwu końcach całej jednostki [3]. Uzwojenia poszczególnych faz transformatora dodawczego po stronie górnego napięcia nie są połączone ani w gwiazdę, ani w trójkąt. Są one włączone do układu przesyłowego szeregowo. Uzwojenia po stronie dolnego napięcia mogą być zasilane napięciami fazowymi lub międzyfazowymi z transformatora wzbudającego TW lub bezpośrednio z trzeciego uzwojenia jednostki głównej. Rolą transformatora wzbudającego TW jest zapewnienie zasilania transformatora dodawczego TD napięciem o odpowiedniej wartości, kącie fazowym i kolejności faz. Rolę transformatora wzbudającego może również pełnić trzecie uzwojenie jednostki głównej (rys. 2a). Jednak wyposażenie jednostki dodawczej w transformator wzbudający (rys. 2b) jest eksploatacyjnie wygodniejsze – m.in. w przypadku uszkodzenia

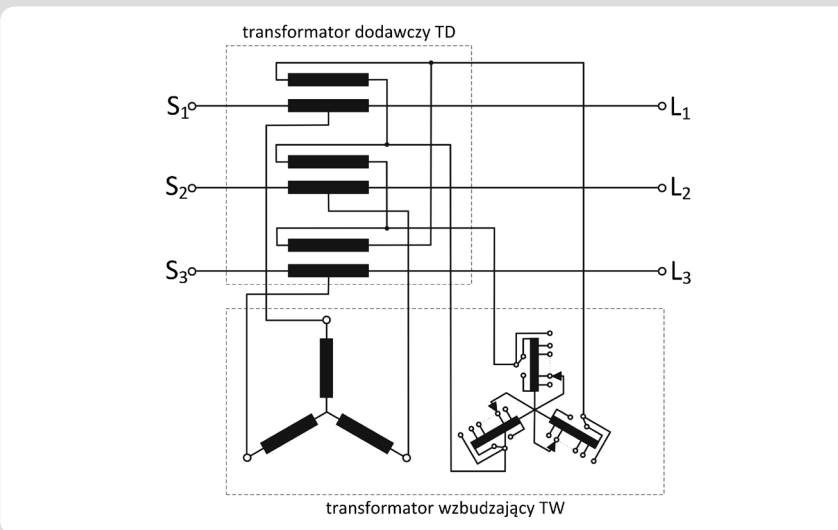


Rys. 1. Schemat funkcjonalny układu regulacji przekładni transformatora



Rys. 2. Przykładowe schematy ideowe transformatora regulacyjnego:

a) zasilanie transformatora dodatkowego z trzeciego uzwojenia jednostki głównej; b) zasilanie transformatora dodatkowego z transformatora wzbudającego



Rys. 3. Schemat połączeń jednostki dodatkowej transformatora regulacyjnego

przełącznika zaczepek lub transformatora dodatkowego można „zmstkwować” transformatory TD i TW. Umożliwi to dopuszczenie do pracy zespołu transformatorowego złożonego wówczas jedynie z jednostki głównej – uszkodzone urządzenia mogą być naprawiane bez długotrwałej przerwy w pracy stacji transformatorowej. Przykładowy 3-fazowy schemat połączeń transformatora wzbudającego z transformatorem dodatkowym przedstawiono na rys. 3.

Podstawowe rodzaje regulacji, które mogą być realizowane za pomocą jednostki dodatkowej, przedstawiono z wykorzystaniem wykresów wskazowych na rys. 4 [1]. Napięcia wprowadzane do poszczególnych faz układu przesyłowego przez transformator dodatkowy (ΔU_A , ΔU_B , ΔU_C) są proporcjonalne do napięć, którymi zasilane są uzwojenia pierwotne tego transformatora

(rys. 4a). Z wykresów wskazowych wektorów napięć fazowych i wektorów napięć międzyfazowych (rys. 4b) wynika, że wektory napięć są przesunięte o $\pi/2$ w stosunku do wektorów napięć międzyfazowych faz sąsiednich. Wykorzystanie tego faktu, przy zasilaniu transformatora dodatkowego lub wzbudającego, pozwala na uzyskanie przesunięcia kąтового napięcia $\Delta \underline{U}$ (rys. 4d).

W przypadku zasilania transformatora dodatkowego z transformatora wzbudającego napięciami fazowymi o niezmiennionej kolejności faz (U_A , U_B , U_C) uzyskuje się napięcia dodatkowe w postaci: $\Delta U_A' = \beta U_A$, $\Delta U_B' = \beta U_B$, $\Delta U_C' = \beta U_C$, gdzie β jest wypadkową przekładni transformatora wzbudającego i transformatora dodatkowego. Wówczas (rys. 4c) wektory napięć U_A' , U_B' , U_C' na wyjściu uzwojenia szeregowego jednostki dodatkowej są w fazie z wektorami

napięć U_A , U_B , U_C zasilających (na wejściu uzwojenia szeregowego) jednostkę dodatkową. W takim przypadku zespół transformatorowy służy jedynie do zmiany wartości napięcia w układzie przesyłowym (wartość kąta fazowego napięcia pozostaje niezmienną). Taki rodzaj regulacji nazywany jest regulacją wzdłużną. Efekt realizacji tego rodzaju regulacji w zespole transformatorowym jest równoważny regulacji uzyskiwanej w konwencjonalnych transformatorach i autotransformatorach za pomocą regulacji zaczepek zmieniającej przekładnię transformatora i tym samym wartość napięcia danego uzwojenia.

Inny efekt regulacji uzyskuje się przy zasilaniu strony dolnego napięcia transformatora dodatkowego napięciami międzyfazowymi faz sąsiednich (bądź napięciami fazowymi o zmienionej kolejności faz). W takim przypadku otrzymuje się napięcia dodatkowe w postaci: $\Delta U_A' = \gamma U_{BC}$, $\Delta U_B' = \gamma U_{CA}$, $\Delta U_C' = \gamma U_{AB}$, gdzie γ jest wypadkową przekładni transformatora wzbudającego i transformatora dodatkowego. Wektory tych napięć są przesunięte w fazie o $\pi/2$ w stosunku do wektorów napięć U_A , U_B , U_C przed jednostką dodatkową (kątem $\pi/2$ uzyskuje się dla przypadku zasilania transformatora dodatkowego napięciami międzyfazowymi odpowiednich faz sąsiednich; dla przypadku zasilania napięciami fazowymi o zmienionej kolejności faz wartość kąta zależy od kolejności faz). Powoduje to, że wektory napięć na wyjściu uzwojenia szeregowego jednostki dodatkowej (U_A' , U_B' , U_C') są przesunięte w fazie o kąt θ w stosunku do wektorów napięć przed tym uzwojeniem jednostki dodatkowej (U_A , U_B , U_C). Należy zauważyć, że wartość kąta θ zależy od długości wektorów napięć dodatkowych ($\Delta U_A'$, $\Delta U_B'$, $\Delta U_C'$). Tym samym zmiana długości wektorów (modułu) napięć dodatkowych umożliwia regulację kąta fazowego napięcia za zespołem transformatorowym. Taki sposób regulacji nazywany jest regulacją poprzeczną.

Regulacja wzdłużno-poprzeczna polega na połączeniu regulacji wzdłużnej i regulacji poprzecznej. Regulacja tego typu umożliwia regulację modułu napięcia oraz kąta fazowego napięcia. Może być ona realizowana dwoma sposobami [4]:

- rozdzielnie (regulacja wzdłużno-poprzeczna niezależna) – w przypadku takich rozwiązań regulacja wzdłużna odbywa się zwykle na jednostce głównej zespołu transformatorowego, natomiast regulacja poprzeczna odbywa się na jednostce dodatkowej; obydwa wymienione rodzaje regulacji mogą być wykonywane niezależnie (tj. regulacja danego parametru napięcia – moduł bądź kąt fazowy – nie pociąga za sobą zmian drugiego z parametrów napięcia)
- łącznie (regulacja wzdłużno-poprzeczna zależna) – regulacja wzdłużna i regulacja poprzeczna odbywa się na jednostce dodatkowej; obydwa wymienione rodzaje regulacji wykonuje się współzależnie (tj. regulacja jednego parametru napięcia – moduł bądź kąt fazowy – pociąga za sobą zmianę drugiego z parametrów napięcia); regulację wzdłużno-poprzeczną realizowaną łącznie zwykle nazywa się regulacją skośną.

Przyporządkowanie przedstawionych rodzajów regulacji do urządzeń

elektroenergetycznych, które umożliwiają realizację regulacji wzdłużnej, poprzecznej i wzdłużno-poprzecznej, zamieszczono na rys. 5. Urządzeniami realizującymi regulację wzdłużną (regulacja modułu napięcia) są transformatory i autotransformatory z regulacją zaczepów. Do realizacji wyłącznie regulacji poprzecznej (regulacja kąta fazowego napięcia) są predestynowane tzw. przesuwники fazy (przesuwники fazowe). Natomiast regulację wzdłużno-poprzeczną (regulacja modułu i kąta fazowego napięcia) umożliwiają transformatory regulacyjne w postaci zespołów transformatorowych składających się z jednostki głównej i jednostki dodawczej.

Efekty regulacji z wykorzystaniem zespołów transformatorowych

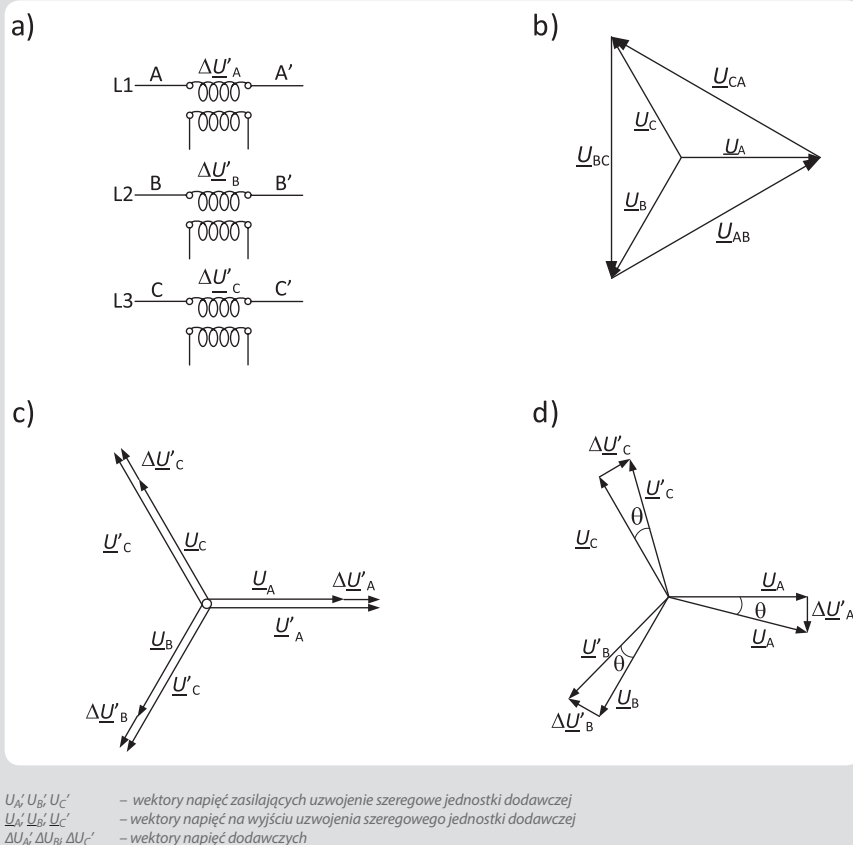
Rozważając zasadność regulacji prowadzonej z wykorzystaniem zespołów transformatorowych z regulacją wzdłużno-poprzeczną, przeprowadzono analizy, w których zbadano efekty sieciowe realizowanej regulacji. W tym celu sparometryzowano modele transformatorów regulacyjnych, tak aby stanowiły one odzwierciedlenie układów rzeczywistych. W analizach uwzględniono model zespołu transformatorowego z regulacją wzdłużno-poprzeczną zależną (skośną). Model takiego zespołu zdefiniowano jako pojedynczy obiekt elektroenergetyczny, reprezentujący jednostkę główną i jednostkę dodawczą rzeczywistego zespołu transformatorowego.

Analizę pracy zespołów transformatorowych przeprowadzono w układzie sieci zamkniętej 400 kV i 220 kV Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Analizie poddano układ sieciowy, którego struktura i zbiór elementów sieciowych odzwierciedla stan bieżący KSE w zimowym szczycie obciążenia. Układem odniesienia był układ bazowy bez regulacji skośnej (o nastawie zaczepu neutralnego) nazywanym dalej scenariuszem bazowym S0. W obliczeniach skoncentrowano się na określeniu wartości przepływów mocy czynnej na elementach KSE. Na rys. 6 przedstawiono rozpyły mocy w bezpośrednim otoczeniu sieciowym stacji z zainstalowanym zespołem transformatorowym z regulacją (transformator wyróżniono wyszarzonym tłem). W analizie wybrano transformator oznaczony jako A1 zainstalowany w węźle Joachimów.

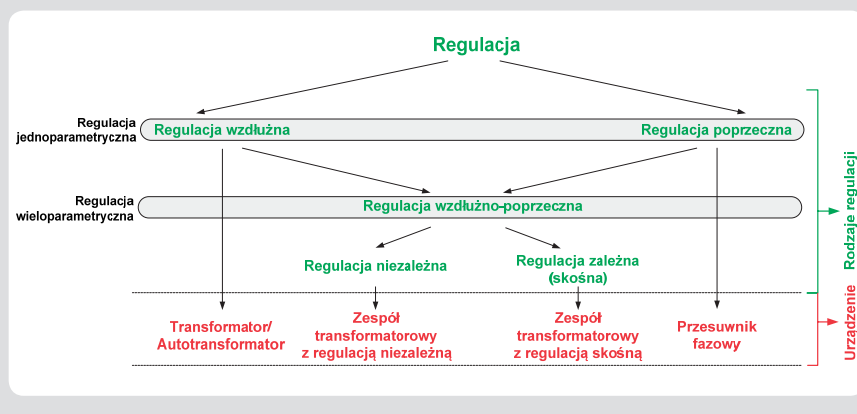
Badając efekty pracy zespołu transformatorowego z regulacją wzdłużno-poprzeczną, przeanalizowano cztery scenariusze pracy (rys. 7):

- scenariusz S1:
kąt regulacji $\alpha = -120^\circ$, zaczep 1
- scenariusz S2:
kąt regulacji $\alpha = -120^\circ$, zaczep 19
- scenariusz S3:
kąt regulacji $\alpha = 120^\circ$, zaczep 1
- scenariusz S4:
kąt regulacji $\alpha = 120^\circ$, zaczep 19.

Analizując uzyskane wyniki, obliczono zmiany wartości przepływów mocy czynnej podyktowane zmianą scenariusza ustawień parametrów regulacyjnych transformatorów. Zmiany wartości obserwowanych wielkości wyznaczano w odniesieniu do wartości danej wielkości właściwej dla scenariusza S0 (układ bazowy) zgodnie z zależnościami (1) i (2):



Rys. 4. Idea regulacji zespołu transformatorowego: a) uzwojenia transformatora dodawczego; b) napięcia fazowe i napięcia międzyfazowe zasilające jednostkę dodawczą; c) i d) napięcia fazowe na wyjściu jednostki dodawczej (rys. c – dla regulacji modułu; rys. d – dla regulacji kąta)



Rys. 5. Rodzaje typów regulacji i urządzeń transformatorowych je realizujących

$$\Delta P_T = \frac{P_T^{Sx} - P_T^{S0}}{P_T^{S0}} \quad (1)$$

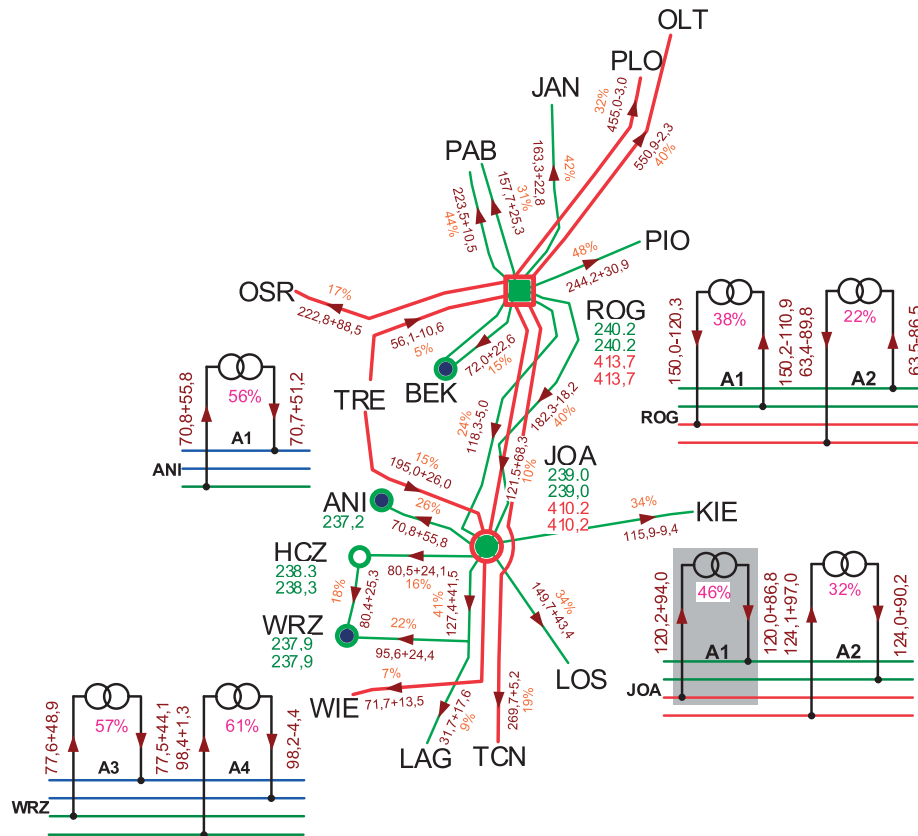
gdzie:
 P_T^{S0} – wartość mocy czynnej płynącej przez transformator dla scenariusza S0,
 P_T^{Sx} – wartość mocy czynnej płynącej przez transformator dla scenariusza Sx (x = 1...4),

$$\Delta \beta = \beta^{Sx} - \beta^{S0} \quad (2)$$

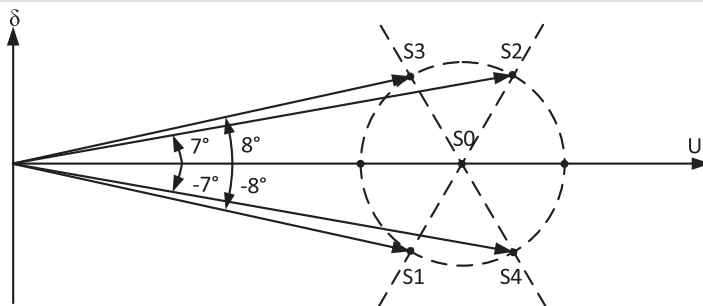
gdzie:
 β^{S0} – stopień obciążenia transformatora dla scenariusza S0
 β^{Sx} – stopień obciążenia transformatora dla scenariusza Sx.

W poniższej tabeli przedstawiono przepływy mocy oraz stopnie obciążenia, a także zmianę tych wielkości w wyniku zmiany ustawień transformatora JOA-A1 (zmiany scenariusza).

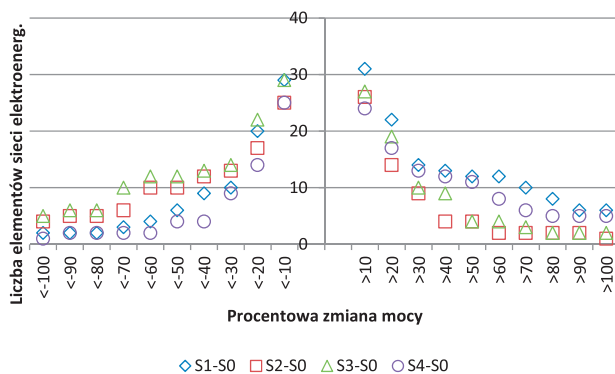
Na rys. 8 przedstawiono zależność liczby elementów sieciowych objętych zmianą warunków pracy (wyrażonych poziomem przepływu mocy) wskutek zmiany scenariusza ustawień parametrów regulacyjnych rozpatrywanego zespołu transformatorowego z regulacją wzdłużno-poprzeczną od zakresu zmiany przepływu. Na wykresie uwzględniono wyłącznie elementy, dla których zmiana przekraczała 10%. Poza analizą rozpyły mocy w stanach normalnych przeprowadzono analizę



Rys. 6. Rozpływ mocy w stacji z transformatorem JOA-A1 oraz w jej otoczeniu sieciowym



Rys. 7. Scenariusze ustawienia parametrów regulacyjnych transformatora z regulacją wzdłużno-poprzączną zależną (skośną)



Rys. 8. Zależność liczby elementów KSE od kierunku i zakresu zmiany przepływu mocy dla różnych scenariuszy regulacji transformatora JOA-A1

wariantową, uwzględniając wyłączenia elementów sieciowych. W obliczeniach uwzględniono scenariusze regulacji S1 oraz S2 i scenariusz bazowy S0. Analizując wpływ regulacji wzdłużno-poprzącznej, przeprowadzanej za pomocą transformatora JOA-A1 400/220 kV, rozpatrzono następujące warianty pracy sieci:

- W0 – układ normalny
- W1 – wyłączenie linii 220 kV relacji Joachimów – Huta Częstochowa
- W2 – wyłączenie linii 400 kV relacji Płock – Rogowiec oraz linii 400 kV relacji Rogowiec – Ołtarzew.

Na rys. 9 przedstawiono zmianę stopnia obciążenia wybranej linii (220 kV relacji Joachimów – Rogowiec) w funkcji scenariusza ustawień parametrów regulacyjnych transformatora JOA-A1.

Podsumowanie

- Realizacja regulacji poprzecznej przez zespoły transformatorowe z regulacją wzdłużno-poprzączną pozwala kształtować przepływy mocy czynnej przez te transformatory i – tym samym – rozpływ mocy w otoczeniu sieciowym miejsca zainstalowania tych jednostek – w KSE w szczególności dotyczy to sieci 400 kV i 220 kV. Podstawowy efekt tej regulacji dotyczy wielkości przepływu mocy (obciążenia) zespołu transformatorowego.
- Zdolności regulacyjne przepływu mocy rozpatrywanych transformatorów z regulacją zależą od ich parametrów konstrukcyjnych (zakres zmian przekładni kątowej δ , wartości impedancji zastępczej itp.) oraz miejsca zainstalowania w KSE

(w tym mocy zwarciowej i struktury otoczenia sieciowego po obu stronach transformatora). Wskazane jest stosowanie takiego rozwiązania regulacyjnego dla rozdziálu obciążeń pomiędzy linie 220 kV oraz 400 kV.

- Dla transformatorów z regulacją wzdłużno-poprzeczną zależną zmianie przekładni kątowej δ towarzyszy zmiana przekładni napięciowej (dla kąta regulacji α różnego od 0°). Wówczas równocześnie ze zmianą kąta przesunięcia fazowego napięć węzłowych następuje zmiana modułu napięcia. Występująca współzależność jest niekorzystna, ponieważ ogranicza możliwości swobodnego kształtowania warunków pracy sieci. W szczególności może to dotyczyć awaryjnych stanów pracy KSE.
- Dla zespołów transformatorowych z regulacją wzdłużno-poprzeczną zależną zainstalowanych w KSE zmiana kąta regulacji α wymaga nie tylko wyłączenia całego zespołu transformatorowego, ale również zmiany kolejności połączeń faz pomiędzy poszczególnymi jednostkami składowymi zespołu transformatorowego. Uniemożliwia to szybką regulację przepływów mocy w stanach awaryjnych pracy KSE wymagających niezwłocznych reakcji. Należy zatem przyjąć, że dla tego typu jednostki bezprzerwowa praca jest zdeterminowana układem połączeń między jednostką główną a dodawczą.

Bibliografia

1. Machowski J., Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
2. Ziemianek S., Zespoły transformatorowe z regulacją przekładni poprzecznej jako sieciowe środki kształtowania przepływów mocy (energii) w SEE, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2006, nr 12.
3. Korab R., Owczarek R., Kształtowanie transgranicznych przepływów mocy z wykorzystaniem transformatorów z regulacją poprzeczną, *Energetyka* 2011, nr 5.
4. Żmuda K., Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze – wybrane zagadnienia z przykładami, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.

Maksymilian Przygodzki

dr hab. inż.

PSE Innowacje sp. z o.o. / Politechnika Śląska

e-mail: maksymilian.przygodzki@pse.pl

Adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, ekspert w firmie PSE Innowacje sp. z o.o. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z funkcjonowaniem sieci elektroenergetycznej, w szczególności w horyzoncie długoterminowym, oraz zagadnieniami związanymi z energią rozproszoną.

Piotr Rzepka

dr inż.

PSE Innowacje sp. z o.o. / Politechnika Śląska

e-mail: piotr.rzepka@pse.pl

Adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, główny konsultant w firmie PSE Innowacje sp. z o.o. Zajmuje się zagadnieniami związanymi m.in. z modelowaniem stanów zakłóceń w SEE, działaniem automatyki elektroenergetycznej (w tym systemami wieloagencyjnymi i zabezpieczeniowymi) oraz określeniem wpływu źródeł rozproszonych na funkcjonowanie automatyki elektroenergetycznej.

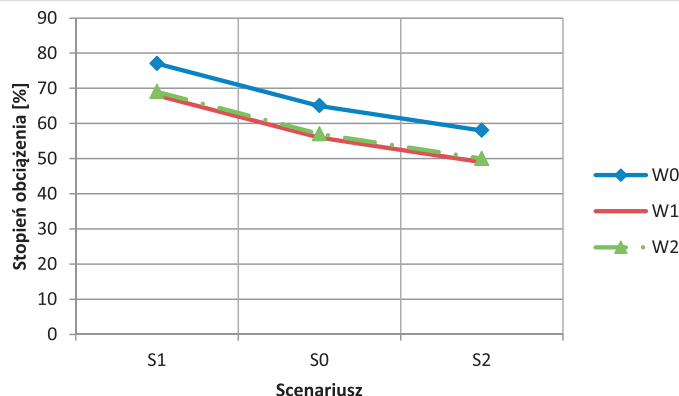
Mateusz Szablicki

dr inż.

PSE Innowacje sp. z o.o. / Politechnika Śląska

e-mail: mateusz.szablicki@pse.pl

Asystent w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, główny konsultant w firmie PSE Innowacje sp. z o.o. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z systemami automatyki elektroenergetycznej układów sieciowych złożonych funkcjonalnie i konfiguracyjnie (w tym systemami wieloagencyjnymi, pomiarami synchronicznymi, sieciami typu smart) oraz modelowaniem i symulacją warunków pracy obiektów elektroenergetycznych (zwłaszcza elektromagnetycznych stanów przejściowych).



Rys. 9. Zmiany stopnia obciążenia linii 220 kV relacji Joachimów – Rogowiec dla różnych wariantów pracy KSE i scenariuszy ustawień regulacyjnych transformatora

Wielkość		Wartości poszczególnych wielkości w zależności od przyjętego scenariusza ustawienia parametrów regulacyjnych transformatora				
Scenariusz		S0	S1	S2	S3	S4
P_T	MW	120,2	-255,9	411,4	496,7	-175,1
β	%	46,0	83,0	158,0	156,0	109,0
Scenariusz		–	S1-S0	S2-S0	S3-S0	S4-S0
ΔP_T	%	–	-312,8	242,1	313,0	-245,6
$\Delta \beta$	%	–	37,0	112,0	110,0	63,0

Tab. 1. Przepływy mocy czynnej, stopnie obciążenia transformatora JOA-A1 oraz zmiany tych wielkości dla różnych scenariuszy ustawienia parametrów regulacyjnych transformatora