

STEROWANIE PRZEPLYWAMI MOCY W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM Z WYKORZYSTANIEM TRANSFORMATORÓW Z REGULACJĄ WZDŁUŻNO-POPZRZECZNĄ

Maksymilian PRZYGRÓDZKI^{1,2}, Piotr RZEPKA^{1,2}, Mateusz SZABLICKI^{1,2}

1. PSE Innowacje sp. z o.o., ul. Warszawska 165, 05-520 Konstancin-Jeziorna, e-mail: maksymilian.przygodzki@pse.pl
2. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

Streszczenie: Transformatory z regulacją wzdużno-poprzeczną pozwalają na kształtowanie zarówno poziomu, jak i kąta napięcia. Daje to możliwość regulacji parametrów stanu układu przesyłowego, a w efekcie wpływa na zmianę rozpyłu mocy (w tym mocy czynnej) w sieciach elektroenergetycznych. W artykule przedstawiono ideę regulacji wzdużno-poprzecznej oraz model zespołu transformatorowego. Wykorzystując model sieciowy zespołu transformatorowego przeprowadzono analizy sieciowe skupione na ocenie możliwości sterowania rozpyłem mocy. Dla wybranego zespołu transformatorowego przedstawiono wyniki wykonanych obliczeń.

Słowa kluczowe: rozpył mocy, zespół transformatorowy, regulacja wzdużno-poprzeczna.

1. WSTĘP

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. Duże możliwości regulacji przesyłu mocy czynnej daje zmiana różnicy kątów napięć węzłowych. Sterowanie takie umożliwia nie tylko zmianę wartości mocy, ale również kierunku przepływu.

Jednym z podstawowych urządzeń wykorzystywanych do regulacji parametrów energii jest transformator lub zespół transformatorowy z regulacją przekładni. Regulacji dokonuje się, zmieniając położenie przełącznika zaczeów. Daje to skokową zmianę przekładni transformatora / zespołu transformatorowego. W transformatorach dużej 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 [1]: napięcia, mocy biernej, a także mocy czynnej.

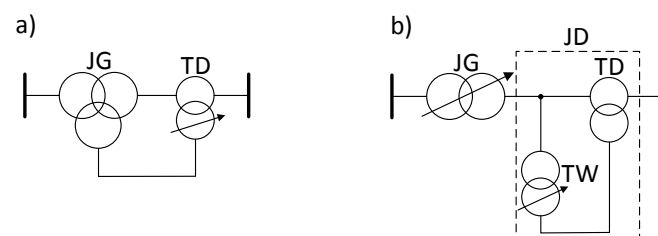
2. RODZAJE REGULACJI REALIZOWANEJ ZA POMOCĄ TRANSFORMATORA

Za pomocą transformatorów regulacyjnych można realizować następujące rodzaje regulacji:

- regulację wzdużną;
- regulację poprzeczną;
- regulację wzdużno-poprzeczną.

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 zaczeów, miejscem lokalizacji oraz sposobem wykonania przełącznika zaczeów, liczbą transformatorów wchodzących w skład zespołu transformatorowego, sposobem połączenia tych transformatorów.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe schematy ideowe transformatorów regulacyjnych umożliwiających regulację wzdużno-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 wzbudzającego (TW).



Rys. 1. Przykładowe schematy ideowe transformatora regulacyjnego: a) zasilanie transformatora dodawczego z trzeciego uzwojenia jednostki głównej; b) zasilanie transformatora dodawczego z transformatora wzbudzającego

Transformator dodawczy TD 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 połą-

czone 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 wzbudzającego TW lub bezpośrednio z trzeciego uzwojenia jednostki głównej. Rolą transformatora wzbudzającego TW jest zapewnienie zasilania transformatora dodatkowego TD napięciem o odpowiedniej wartości, kącie fazowym i kolejności faz.

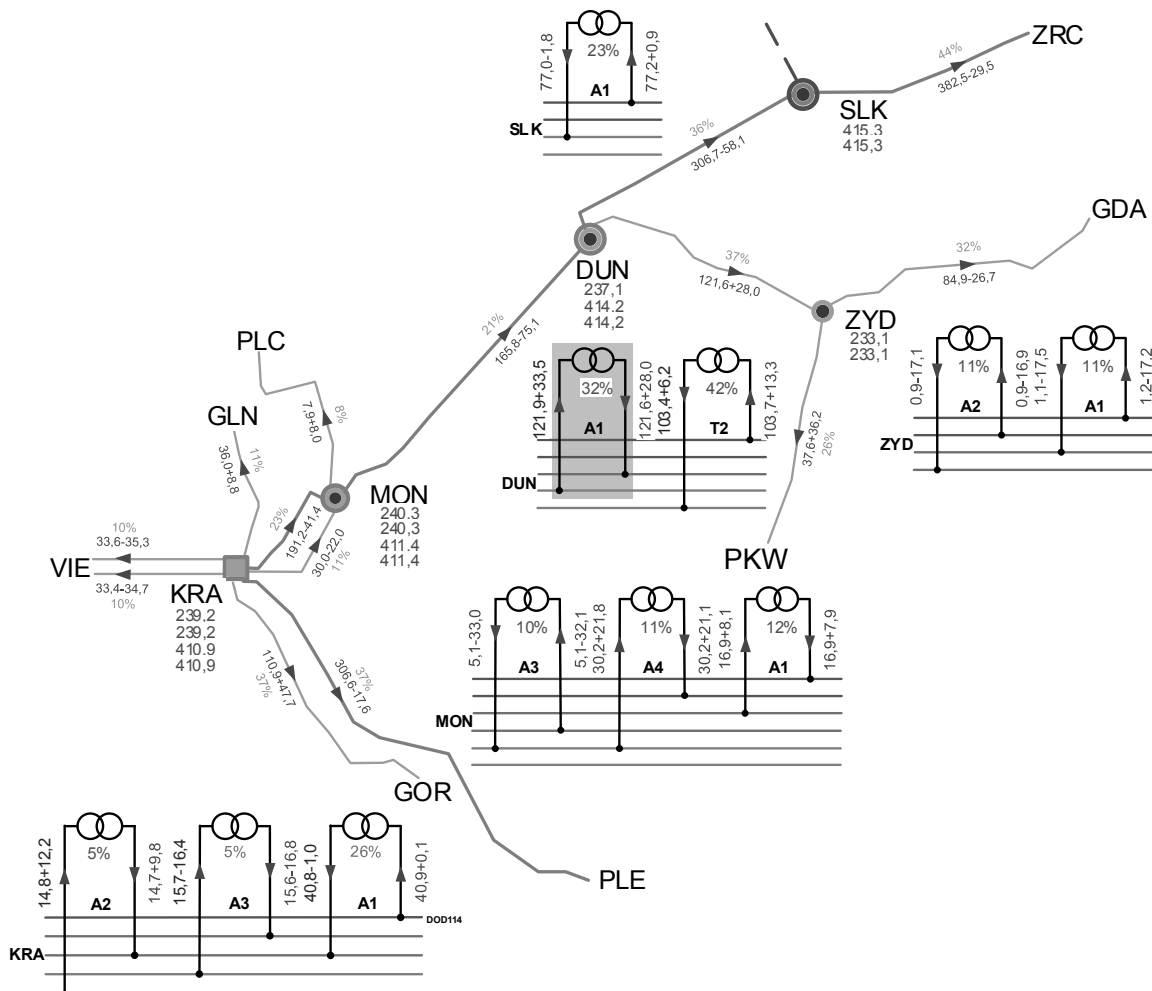
Regulacja wzdłużno-poprzeczna polega na połączeniu regulacji wzdłużnej i regulacji poprzecznej. Regulacja tego typu umożliwia regulację modułu napięcia oraz kąta fazowego napięcia. Może być ona realizowana dwoma sposobami [4]:

- 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 parametru);
- 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.

Rozpatrując urządzenia transformatorowe w ogólnym przypadku urządzeniami realizującymi regulację wzdłużną (regulacja modułu napięcia) są transformatory i autotransformatory z regulacją zaczerpów. Do realizacji wyłącznie regulacji poprzecznej (regulacja kąta fazowego napięcia) są predestynowane tzw. przesuwniki fazy (przesuwniki 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 dodatkowej.

3. ANALIZA REGULACJI Z WYKORZYSTANIEM ZESPOŁÓW TRANSFORMATOROWYCH

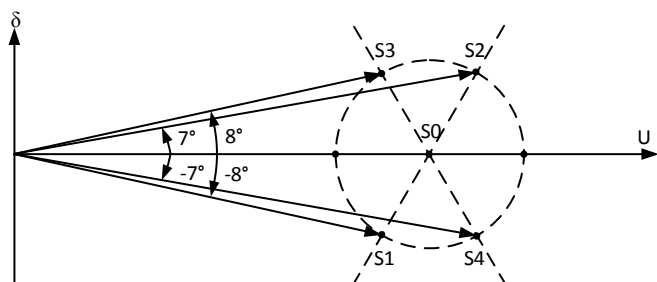
Analizę pracy zespołów transformatorowych wyposażonych w regulację wzdłużno-poprzeczną przeprowadzono w układzie sieci zamkniętej 400 kV i 220 kV Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Analizie poddano układ sieciowy, którego struktura i zbiór elementów sieciowych odzwierciedla stan pracy KSE w zimowym szczycie obciążenia. Układem odniesienia był układ bazowy bez regulacji skośnej (o nastawie zaczerpu neutralnego) nazywany dalej scenariuszem bazowym S0. W obliczeniach skoncentrowano się na określeniu wartości przepływów mocy czynnej na elementach KSE. Na rysunku 2 przedstawiono rozplwy 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 węzle Dunowo.



Rys. 2. Rozplwy mocy w stacji z transformatorem DUN-A1 oraz w jej otoczeniu sieciowym

Badając efekty pracy zespołu transformatorowego z regulacją wzdłużno-poprzączną przeanalizowano cztery scenariusze pracy (rys. 3):

- scenariusz S1: kąt regulacji $\alpha = -120^\circ$, zaczepek 1;
- scenariusz S2: kąt regulacji $\alpha = -120^\circ$, zaczepek 25;
- scenariusz S3: kąt regulacji $\alpha = 120^\circ$, zaczepek 1;
- scenariusz S4: kąt regulacji $\alpha = 120^\circ$, zaczepek 25.



Rys. 3. Scenariusze ustawienia parametrów regulacyjnych transformatora z regulacją wzdłużno-poprzączną zależną

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). Obserwacji podlegała wartość mocy czynnej płynącej przez transformator P_T oraz stopień obciążenia transformatora β , a także zmiany tych wielkości wyznaczone zgodnie z zależnościami (1) i (2), w których przez S_x oznaczono dany scenariusz regulacji ($x=1,2,3,4$).

$$\Delta P_T = \frac{P_T^{S_x} - P_T^{S_0}}{P_T^{S_0}} \quad (1)$$

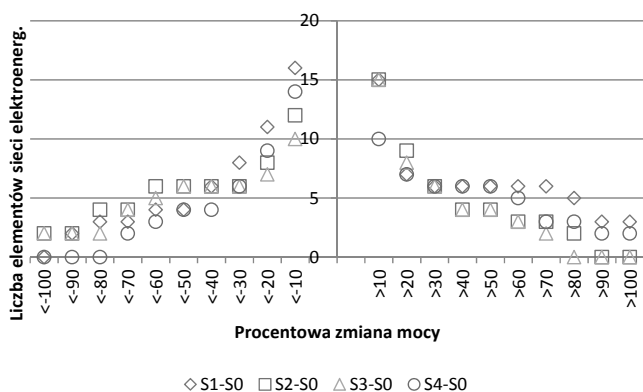
$$\Delta \beta = \beta^{S_x} - \beta^{S_0} \quad (2)$$

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

Tablica 1. Przepływy mocy czynnej, stopnie obciążenia transformatora DUN-A1 oraz zmiany tych wielkości dla różnych scenariuszy

| 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 |

Na rysunku 4 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-poprzączną od zakresu zmiany przepływu. Na wykresie uwzględniano wyłącznie elementy, dla których zmiana przekraczała 10%.



Rys. 4. Zależność liczby elementów KSE od kierunku i zakresu zmiany przepływu mocy dla różnych scenariuszy regulacji transformatora DUN-A1

4. PODSUMOWANIE

- Realizacja regulacji poprzecznej przez zespoły transformatorowe z regulacją wzdłużno-poprzączną pozwala kształtować przepływy mocy czynnej przez te transformatory i – tym samym – rozprzeczony przepływ mocy w otoczeniu sieciowym miejsca zainstalowania tych jednostek – w KSE w szczególności dotyczy to powiązania 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). Wskazaniem jest stosowanie takiego rozwiązania regulacyjnego dla rozdziału mocy pomiędzy linie 220 kV oraz 400 kV.
- Dla transformatorów z regulacją wzdłużno-poprzączną 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-poprzączną 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.

5. 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 nr 12/2006.
3. Korab R., Owczarek R.: Kształtowanie transgranicznych przepływów mocy z wykorzystaniem transformatorów z regulacją poprzeczną. Energetyka nr 5/2011.
4. Żmuda K.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze – wybrane zagadnienia z przykładami. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.

THE CONTROL OF POWER FLOWS IN POWER SYSTEM USING PHASE-ANGLE VOLTAGE CONTROL TRANSFORMERS

The functioning of the power transmission system is the result of using, among others, devices for the transmission and transformation electricity. Proper operation and control of these devices allows to maintain the correct parameters and continuity of electricity supply to final customers. In the group of devices of electricity transformation it can be distinguished from control transformers that have the ability to shape both the magnitude and the angle of voltage. In this way, it can be adjusted state parameters of power system allow the selection of the size of active and reactive power transmission. This property lets they provide a potential opportunity to influence the power load flow (including active power) in electric power networks. The paper is presented a problem of phase-angle voltage control in power system and model of such a transformer unit. The presented transformer unit model are used for power network calculation, especially to power flows control. It was prepare some power flows cases in high voltage networks. There is presented results of power flow system study with using the voltage angle control of such transformer units.

Keywords: power flow, transformer unit, phase-angle voltage control