

Budowa modelu symulacyjnego regulatora przełączników zacze- pów transformatora WN/SN – założenia i wymagania

Jarosław Grzegorz Korpikiewicz

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, Zakład Strategii i Rozwoju Systemu, ul. Mikołaja Reja 27, 80-870 Gdańsk

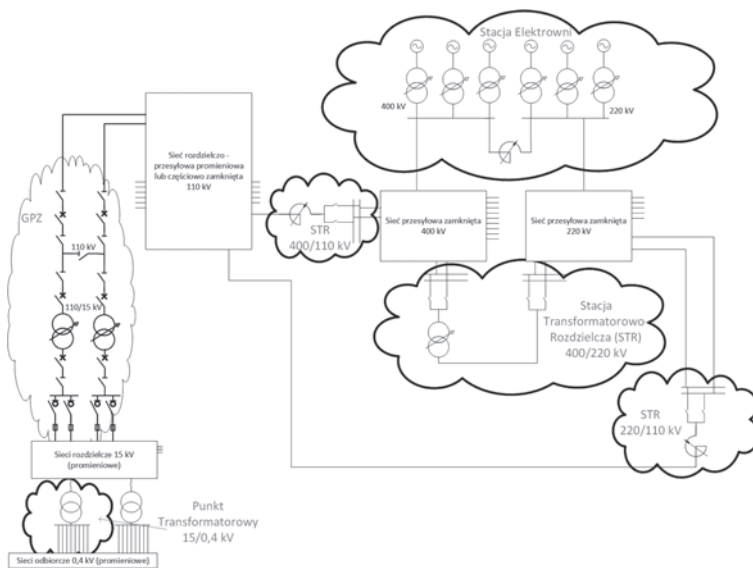
Streszczenie: W artykule zaprezentowano układ regulacji napięcia po stronie SN w stacji 110/15 kV. Kierunek sterowania napięcia zależny jest od miejsca instalacji przełącznika zacze- pów oraz sposobu włączenia uzwojenia regulacyjnego. Wielkościami zakłócającymi w tym układzie są zmiany wartości skutecznego napięcia zasilającego transformator i zmiany zapotrzebowania oraz zmiany generacji w sieciach SN i nn. Zaprezentowano budowę i algorytm pracy regulatora przełączników zacze- pów na przykładzie regulatora URT. Zidentyfikowano wymagania i założenia dla modelu symulacyjnego utworzonego w środowisku MATLAB/Simulink. Model zostanie zbudowany w celu przeprowadzenia badań symulacyjnych wpływu rodzaju regulatora (algorytmu/ budowy) na jakość regulacji napięcia SN. Model ten umożliwi ocenę wpływu niesterowanych źródeł przyłączonych do sieci SN lub nn na jakość regulacji napięcia w tych sieciach.

Słowa kluczowe: podobciążeniowy przełącznik zacze- pów, model symulacyjny, regulator przełącznika zacze- pów, regulacja napięcia w sieci SN

1. Wprowadzenie

Temat regulacji napięcia i mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych jest często poruszany w wielu publikacjach. Jedną z metod jest wykorzystanie podobciążeniowych przełączników zacze- pów. Sterowanie przekładnią transformatora regulacyjnego wpływa bezpośrednio na napięcia rozdzielni po obu jego stronach oraz na przepływ mocy biernej przez tenże transformator [1–4].

Układy sterowania z podobciążeniowymi prze- łącznikami zacze- pów pełnią różne role zależnie od miejsca instalacji w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym KSE (rys. 1). Inne zadania reali- zowane są przez układ sterowania przełącznikiem zacze- pów transformatora blokowego, inne w stacji NN/WN, a jeszcze inne w Głównym Punkcie Zasi- lania GPZ, tj. stacji WN/SN. Ze względu na to, że sterowanie przełącznikiem zacze- pów zmienia rów- nocześnie kilka wielkości (napięcie górne, napięcie dolne, moc przepływająca) określono ich kryteria regulacji. Kryteria regulacji przełącznikami zacze-



Rys. 1. Struktura KSE z przełącznikami zacze- pów pracującymi pod obciążeniem
Fig. 1. Structure of the power system with on-load tap changers

Autor korespondujący:

Jarosław Grzegorz Korpikiewicz, j.korpikiewicz@ien.gda.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 23.05.2018 r., przyjęty do druku 29.06.2018 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

pów określają, według której wielkości pracuje układ regulacji z przełącznikiem zacze- pów [1, 5]. W kryterium D wartością mierzoną i regulowaną jest strona niższego napięcia. W kryterium G wartością mierzoną i regulowaną jest strona wyższego napięcia. W kryterium Q wyznaczaną i regulowaną wielkością jest moc bierna przepływająca przez (auto)transformator. Kryterium A jest stosowane w układach z generatorami synchronicznymi. Polega ono na dotrzymaniu jednoczesnym napięć po obu

stronach transformatora oraz przepływającej przez niego zadanej mocy biernej. Priorytet najwyższy ma regulacja napięcia strony niższej, następnie strony wyższej. Najniższy priorytet ma regulacja mocy biernej.

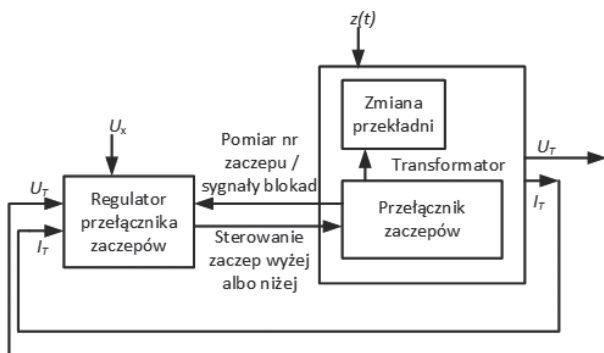
W artykule omawiany jest układ sterowania przełącznikami zacze-
pów w GPZ. W stacji WN/SN układy te pracują wg kry-
terium D, tj. regulacji napięcia po stronie niższej SN. Sieci SN
są sieciami otwartymi, zatem jedynym urządzeniem umożliwia-
jącym korektę wartości napięcia jest transformator regulacyjny
w stacji WN/SN.

Sterowanie przełącznikami zacze-
pów jest poruszane w wielu publikacjach. W artykule [6] wykazano znaczną poprawę jako-
ści regulacji napięcia przy wykorzystaniu energoelektronicznych
przełączników zacze-
pów. Badania zrealizowano stosując ogólnodostępne modele regulatora i transformatora. W artykule [7]
zaprezentowano wpływ pracy przełącznika zacze-
pów na stabilność napięciową węzła sieci elektroenergetycznej. W artykule [8]
przedstawiono transformator regulacyjny jako element wykonawczy
układu regulacji dolnego napięcia. Przedstawiono klasyfikację
przełączników zacze-
pów. Porównano elektromechaniczne i energoelektroniczne podobciążeniowe przełączniki zacze-
pów. Zaproponowano wskaźnik jakości regulacji napięcia. Badania
przeprowadzono na podstawie ogólnodostępnych modeli elemen-
tów sieci elektroenergetycznej. Istnieje wiele publikacji dotyczą-
cych sterowania przełącznikami zacze-
pów [3, 9–23]. Fakt ten potwierdza istniejące nadal zainteresowanie tematem.

2. Układ regulacji dolnego napięcia za pomocą transformatora WN/SN

Wielkością sterowaną jest napięcie transformatora WN/SN po
stronie niższej U_T . Sygnałami sterującymi są sygnały binarne
„zacze-
p wyżej” oraz „zacze-
p niżej” dla przełącznika zacze-
pów. Pomiar prądu służy do ochrony przełącznika zacze-
pów przed
operacjami łączeniowymi przy przeciążeniu, co może skrócić
jego żywotność. Ponadto wykorzystywany jest do kompensacji
prądowej. Na układ regulacji działają zakłócenia, m.in. zmiany
zapotrzebowania mocy czynnej i biernej, zmiana konfiguracji
sieci, zmiana wartości skutecznej napięcia zasilającego trans-
formator. Tradycyjne podobciążeniowe przełączniki zacze-
pów mają ograniczoną liczbę operacji łączeniowych. Układ regulacji
napięcia dolnego zaprezentowano na rys. 2, gdzie: U_x – wartość
zadana napięcia; U_T i I_T – napięcie oraz prąd po dolnej stronie
transformatora; $z(t)$ – zakłócenia układu regulacji.

Jeżeli uchyb napięcia $\varepsilon_U = U_x - U_T$ jest większy od połowy
szerokości martwej strefy ΔU oznacza to, że po stronie wtór-
nej transformatora jest zbyt niskie napięcie. Jeżeli taki stan
utrzymuje się przez określony czas, wówczas regulator wysta-
wia sygnał zmiany zacze-
p. Kierunek zmiany numeru zacze-
p zależy jest od miejsca instalacji przełącznika zacze-
pów oraz



Rys. 2. Układ sterowania napięcia dolnego za pomocą przełącznika
zacze-
pów transformatora

Fig. 2. Lower voltage control system using the transformer tap-changer

sposobu włączenia uzwojenia regulacyjnego. Typowo dla sta-
cji WN/SN jest on instalowany po stronie 110 kV w układzie
gwiazdowym. Zatem zwiększenie numeru zacze-
p przy uzwoje-
niu regulacyjnym włączonym w kierunku zgodnym z kierunkiem
uzwojenia głównego powoduje zmianę przekładni zwojowej wg
znanych zależności (1):

$$k_1 = \frac{N_{GN}}{N_{DN}} \cong \frac{U_{GN}}{U_{DN}}, \quad k_2 = \frac{N_{GN} + n}{N_{DN}} \rightarrow U_{DN} = \frac{U_{GN}}{k_1} \quad (1)$$

gdzie: N_{GN} – liczba zwojów uzwojenia górnego napięcia (przy
pracy na określonym zacze-
pie), N_{DN} – liczba zwojów dolnego
napięcia, n – zmiana liczby zwojów uzwojenia regulacyjnego
przy zmianie zacze-
p o 1, U_{GN} – napięcie górne, U_{DN} – napię-
cie dolne.

W rozpatrywanym układzie zwiększenie numeru zacze-
p (wzrost przekładni zwojowej) powoduje zmniejszenie napię-
cia dolnego (napięcie dolne jest odwrotnie proporcjonalne do
przekładni), przy stałym napięciu górnym. Jest to kierunek
sterowania Z + U-. W celu zwiększenia dolnego napięcia regu-
lator powinien wystawić aktywny sygnał sterujący „zmniejsz
numer zacze-
p” dla przełącznika zacze-
pów. Analogicznie proces
odbywa się przy uchybie ujemnym. Przy połączonym uzwojeniu
regulacyjnym w kierunku odwrotnym do kierunku uzwojenia
głównego kierunek sterowania będzie Z + U+.

Na wartość napięcia dolnego mają wpływ: napięcie górne,
aktualna wartość przekładni napięciowej, pobierana moc czynna
i bierna przez odbiorców zasilanych z tej stacji oraz praca ewen-
tualnych źródeł rozproszonych. Zmiany tych wielkości (oprócz
przekładni) stanowią zakłócenia układu sterowania.

3. Struktura stanowiska badawczego

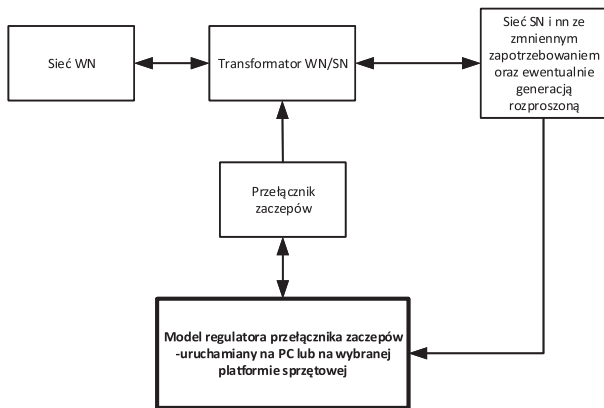
Siec 110 kV jest siecią zamkniętą (najczęściej oczkową), typowo
zasilaną z sieci 400 kV i 220 kV. Napięcie górne na transfor-
matorze można wyznaczyć z rozplywu mocy czynnych i bier-
nych tej sieci. To wymaga użycia aplikacji do rozplywu mocy.
Po stronie niższego napięcia są przyłączone linie SN. Sieci
te są sieciami otwartymi. Ewentualne oczka są rozdzielone
łącznikami zwanymi punktami podziału, co umożliwia szybką
rekonfigurację sieci w stanach awaryjnych. Zmiana przekładni
transformatora wpływa na napięcia po obu jego stronach WN
i SN. Sumaryczne zapotrzebowanie na moc czynną i bierną
w sieci SN ma wpływ na napięcie U_T .

Na rys. 3 zaprezentowano elementy stanowiska badawczego.
Przewidziano następujące etapy badań:

1. Symulacyjne – wszystkie elementy są realizowane progra-
mowo w środowisku MATLAB/Simulink. Ten etap ma zwer-
yfikować struktury samych modeli oraz wykazać ewentualne
możliwości poprawy jakości regulacji napięcia. Symulacja
układu regulacji ciągła i dyskretna.
2. Symulacyjno-fizyczne – praca regulatora realizowana jest na
wybranej platformie sprzętowej. Pozostała część układu regu-
lacji realizowana jest symulacyjnie. Sygnały wejściowe i wyj-
ściowe regulatora przekazywane są z pomocą wybranego
kanału komunikacji (np. UART/USB) między platformą
sprzętową a komputerem z oprogramowaniem MATLAB/
Simulink. Symulacja układu regulacji dyskretna. Podczas tej
fazy badań nie uwzględnia się właściwości układów wejści-
owych (przetworników analogowo-cyfrowych, zewnętrznych
układów pomiarowych) ani układów wyjściowych (urządzeń
wykonawczych i pośredniczących).
3. Symulacyjno-fizyczne z obwodami wejść/wyjść – praca regu-
latora realizowana jest na wybranej platformie sprzętowej.
Pozostała część układu regulacji realizowana jest symulacyj-
nie. Sygnały wejściowe i wyjściowe regulatora przekazywane

są za pomocą wejść i wyjść fizycznych platformy sprzętowej, tj. przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych oraz GPIO. Symulacja układu regulacji dyskretna.

W artykule rozpatrywany jest model regulatora przełączników zacze- pów transformatora WN/SN.



Rys. 3. Struktura stanowiska badawczego
Fig. 3. Structure of the study stand

4. Algorytm, budowa i tryby pracy tradycyjnego regulatora przełącznika zacze- pów

Na rys. 4. zaprezentowano schemat połączeń regulatora URT. Dokumentację tego regulatora przedstawiono w [24]. Układ regulacji transformatorowej URT przeznaczony jest do stosowania w stacjach SN, do automatycznego utrzymywania zadanej wartości napięcia strony niższej transformatora wyposażonego w podobciążeniowy przełącznik zacze- pów. Wykonywany jest w wersji dla jednego, dwóch, trzech lub czterech transformatorów. Przystosowany jest do współpracy z systemami zdalnego sterowania za pomocą sygnałów dwustanowych jak i za pomocą łącza szeregowego [24]. W dalszej części pracy nie rozważano pracy równoległej transformatorów, ponieważ jest to układ stosowany wyjątkowo przez operatorów sieci dystrybucyjnej. Jest to spowodowane wzrostem mocy zawarciowej i wzrostem wymagań dla łączników i zabezpieczeń.

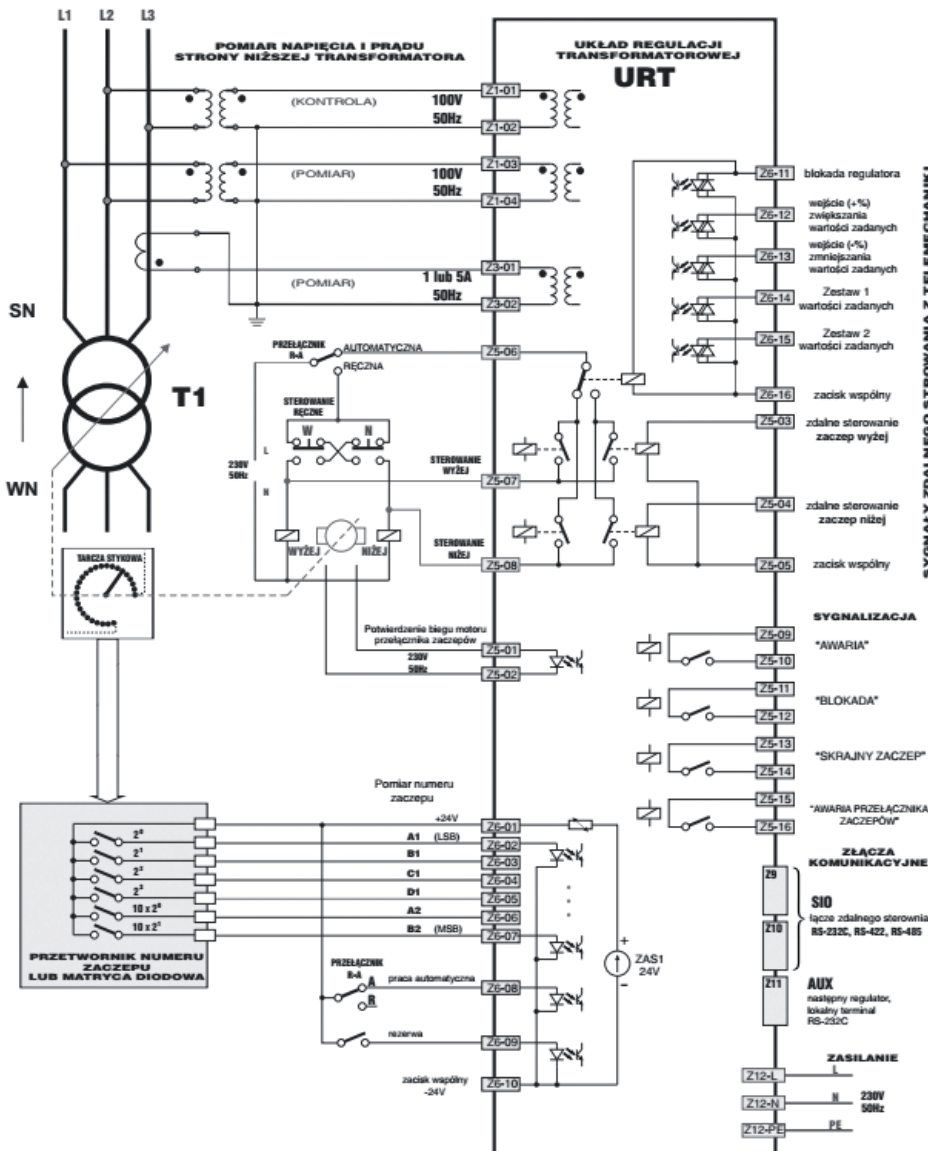
Pomiar napięcia międzyfazowego odbywa się za pomocą przekładników napięciowych. Istnieją dwa tory pomiarowe w celu identyfikacji znacznej asymetrii napięć lub awarii układu pomiarowego. Sygnał pomiarowy kontrolny napięcia przyłożony jest do zacisków Z1-01 i Z1-02. Sygnał pomiarowy właściwy napięcia pobierany jest z zacisków Z1-03 i Z1-04. Jeżeli różnica między

napięciem pomiarowym i kontrolnym wynosi więcej niż 5%, generowany jest sygnał błędny dU. Wówczas problem jest diagnozowany przez obsługę. Proces regulacji napięcia na podstawie niewłaściwych sygnałów pomiarowych nie powinien być kontynuowany. Standardowy sygnał wyjściowy z przekładników napięciowych to 100 V AC. Jest to wielkość regulowana.

Kolejnym sygnałem wejściowym jest wynik pomiaru wartości prądu za pomocą przekładnika prądowego (Z3-01, Z3-02). Pomiar ten nie jest dublowany, brak weryfikacji. Standardowym sygnałem wyjściowym z przekładników prądowych jest prąd 5 A AC. Regulator zależnie od wersji może mieć wejście o znamionowym prądzie 1 A AC. Sygnał ten jest niezbędny do realizacji blokady przeciążeniowej oraz kompensacji prądowej.

Zaciski z listwy Z5 służą do zabudowania regulatora w układ sterowania szafy. Zaciski Z5-01 i Z5-02 są wykorzystywane tylko wtedy, gdy stosowany jest selsynowy przetwornik numeru zacze- pów i nie ma dostępnego sygnału pomiarowego aktualnego zacze- pu. Sposób pomiaru numeru zacze- pów musi być ustawiony w parametrach regulatora.

Zaciski Z5-07 i Z5-08 są sygnałami sterującymi przełącznik zacze- pów (wyjściowymi regu-



Rys. 4. Schemat połączeń elektrycznych regulatora URT. Układ z jednym transformatorem [24]
Fig. 4. Diagram of electrical connections of the URT controller. System with one transformer [24]

latora). W stanie wysokim mają potencjał 230 V do sterowania stycznikami napędu przełącznika zacze- pów. Zacisk Z5-06 służy do zasilania wyjść regulatora w trybie automatycznym – przez przełącznik A/R. Stan przełącznika A/R przekazywany jest do URT za pomocą zacisku Z6-08. W trybie ręcznym styczniki przełącznika zacze- pów są zasilane poprzez przyciski sterowania ręcznego.

Możliwe są trzy tryby pracy regulatora URT:

- *Automatyczny autonomiczny* – sterowanie przełącznikami wyjściowymi odbywa się na podstawie pomiaru napięcia i algorytmu regulatora. Sygnały sterowania lokalnego lub zdalnego są ignorowane. Wymagane jest, by regulacja napięcia w regulatorze była włączona. Przełącznik trybu A/R musi być w stanie A, a sygnał blokady regulatora Z6-11 w stanie niskim. Jest to podstawowy tryb pracy układu.
- *Sterowanie ręczne lokalne* – sterowanie przełącznikami wyjściowymi odbywa się na podstawie sygnałów z przycisków zamontowanych na szafie sterowniczej – układ zewnętrzny sterowania z pominięciem regulatora. Przełącznik trybu A/R musi być w stanie R. Wówczas obsługa lokalnie może wygenerować sygnał zmiany zacze- pu wyżej lub niżej. Jest to tryb stosowany podczas konserwacji i diagnostyki przez obsługę znajdującą się w stacji.
- *Sterowanie zdalne* – sterowanie przełącznikami wyjściowymi odbywa się na podstawie sygnałów dwustanowych Z5-03 i Z5-04 przy wysokim stanie blokady regulatora Z6-11. Przełącznik A/R musi być w trybie A. Sygnały te mogą pochodzić z systemów nadrzędnego sterowania, np. SCADA. W przypadku wykorzystania tego trybu do budowy zdalnego sterowania wymagane jest zastosowanie wyspy I/O z modułem komunikacyjnym, np. moduł telemetryczny GPRS z wyjściami dwustanowymi.
- *Sterowanie za pomocą łącza szeregowego*. Wymagane jest, by regulacja napięcia w regulatorze była wyłączona. Przełącznik A/R musi być w trybie A. Sterowanie odbywa się np. za pomocą komputera podłączonego do portu szeregowego. Przy wykorzystaniu modemów (telefonicznych i linii telefonicznych, GPRS) z portem szeregowym łatwo zbudować układ zdal-

nego sterowania. Ten tryb stosowany jest też lokalnie jako tryb serwisowy.

Zaciski Z6-02 – Z6-07 to sygnały dwustanowe 24 V z przetwornika numeru zacze- pu lub matrycy diodowej. Zacisk Z6-01 stanowi zasilanie dla tego urządzenia. Zaciski Z5-09 – Z5-16 to bez potencjałowe sygnały dwustanowe Awaria, Blokada, Skrajny zacze- p, Awaria przełącznika zacze- pów.

Regulator ma zegar czasu rzeczywistego, co umożliwia zastosowanie czterech stref czasowych w ciągu doby. Każda strefa ma indywidualne nastawy szerokości strefy nieczułości i wartość zadaną napięcia. Ponadto regulator ma dwa zestawy wartości zadaných, które są aktywowane zdalnie za pomocą telemechani- ki. Może to być użyte w nietypowe dni, np. dodatkowe wolne od pracy.

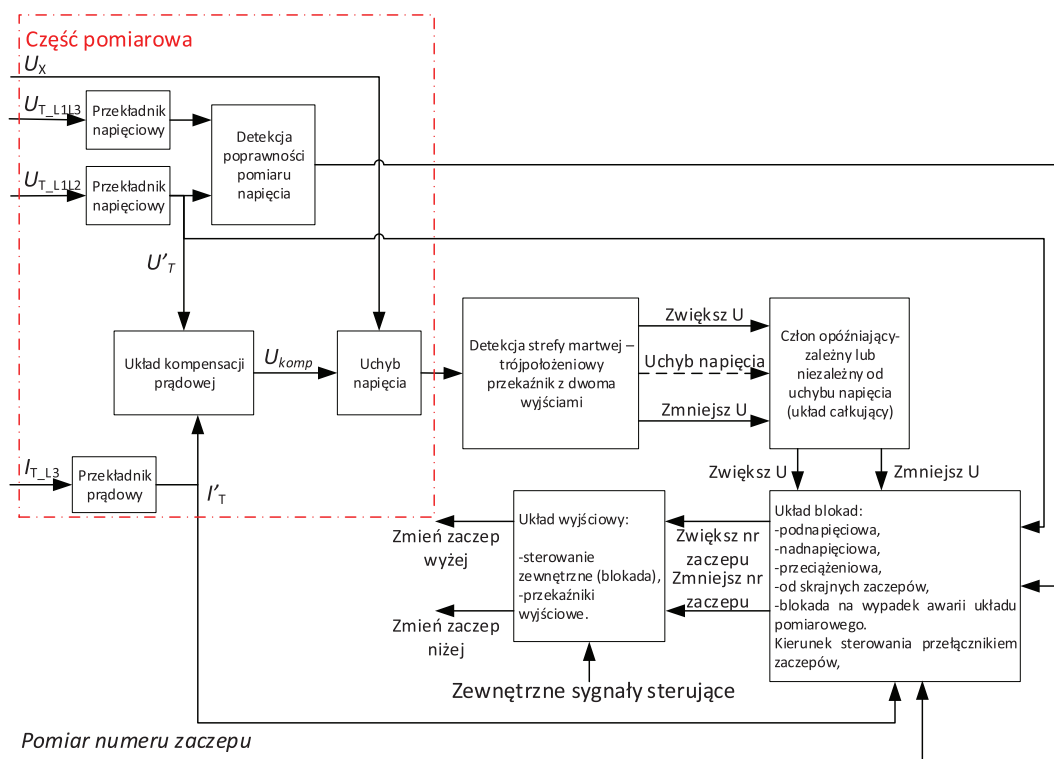
Regulator ma układ kompensacji prądowej. Jego zadaniem jest zapewnienie jakości napięcia u odległego odbiorcy. Jednak w praktyce funkcja ta jest wyłączana [25].

Przytoczone sygnały wejściowe i wyjściowe zostały zapre- zentowane w tabeli 1. Sygnał nr_zacze- pu to skalar w postaci dodatniej liczby całkowitej, w rzeczywistym układzie to wektor sygnałów dwustanowych.

Na rys. 5 zaprezentowano schemat blokowy regulatora prze- łączników zacze- pów transformatora WN/SN.

U_{T_L1L3} , U_{T_L1L2} to pomiary napięcia międzyfazowego. Jeśli wartości skuteczne obu różnią się o więcej niż 5%, wówczas generowany jest błąd przez blok detekcja poprawności pomiaru napięcia i układ blokad nie pozwala na przełączanie zacze- pów. Jeżeli pomiar napięcia jest poprawny, to wykorzystując pomiar prądu w dowolnej fazie realizowany jest układ kompensacji prądowej. Celem kompensacji prądowej jest utrzymanie napięcia nie na „zaciskach transformatora” lecz w głębi sieci. Impedancja kompensacji imituje odcinek sieci między transformatorem WN/SN a odległym odbiorcą. Na podstawie napięcie pomiarowego U_{T_L1L2} oraz spadku napięcia na impedancji kompensacji uzyskujemy napięcie kompensacji U_{komp} . Porównując U_{komp} i wartość zadaną U_x uzyskujemy uchyb napięcia ϵ_u (2).

$$\epsilon_u = U_x - U_{komp} \quad (2)$$



Rys. 5. Schemat blokowy regulatora przełącznika zacze- pów transformatora WN/SN

Fig. 5. Block diagram of the HV/MV transformer tap-changer controller

Tabela 1. Sygnały wejściowe i wyjściowe przedstawione na schemacie blokowym regulatora
Table 1. Input and output signals shown in the controller block diagram

Lp.	Symbol	Opis
1	U_x	Wartość zadana napięcia
2	U_{T_L1L3}	Pomiar kontrolny napięcia międzyfazowego strony niższej transformatora
3	U_{T_L1L2}	Pomiar właściwy napięcia międzyfazowego strony niższej transformatora (inne napięcie międzyfazowe niż pomiar kontrolny)
4	I_{T_L3}	Pomiar prądu po stronie niższego napięcia
5	$nr_zaczeput$	Pomiar numeru zaczeput. Sygnał używany jest do realizacji blokad od skrajnych zaczeput
6	w+	Zmień zaczeput wyżej – sygnał sterujący dwustanowy dla przełącznika zaczeput
7	w-	Zmień zaczeput niżej – sygnał sterujący dwustanowy dla przełącznika zaczeput

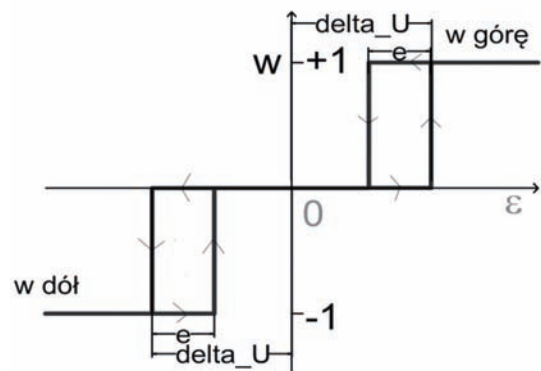
Uchyb napięcia ϵ_u jest wykorzystywany w bloku detekcja martwej strefy – przekaźnik trójpołożeniowy. Zadaniem tego bloku jest ocena uchybu napięcia oraz wygenerowanie sygnałów wewnętrznych – zwiększ U („w górę”) albo zmniejsz U („w dół”). Charakterystykę statyczną przekaźnika trójpołożeniowego z martwą strefą $2\cdot\Delta U$ i histerezą przedstawiono e na rys. 6. Jego zasada działania jest powszechnie znana. Wykorzystanie tego elementu podyktowane jest tym, że regulator ma dwa wyjścia dwustanowe „zwiększ numer zaczeput” oraz „zmniejsz numer zaczeput”. Z tego względu jest to regulator nieciągły oraz liczba zmian zaczeput jest ograniczona trwałością przełącznika. Ograniczona wartość bezwzględna uchybu (3) jest dopuszczalna, ponieważ napięcie zasilania powinno się mieścić w określonych granicach wokół wartości znamionowej np.: $(0,9-1,1)\cdot U_n$, tj.:

$$|\epsilon_u| < \Delta U \quad (3)$$

Regulacja napięcia za pomocą przełącznika zaczeput jest skokowa.

Ze względu na fakt, że zarówno częstotliwość zmian zaczeput jak i całkowita ich liczba jest ograniczona trwałością przełącznika zaczeput, układ regulacji nie może być wrażliwy na krótkotrwałe pojawianie się uchybu powodującego generację sygnału w+ albo w-. Dlatego zmiana zaczeput – w górę lub w dół, zależnie od znaku uchybu – nastąpi po upływie określonego opóźnienia. Zadanie to realizuje człon opóźniający. Jeżeli sygnał $w \neq 0$, to opóźnienie jest zliczane w dół, od wartości początkowej do zera. Aby nastąpiło przełączenie zaczeput sygnał $w = 1$ albo $w = -1$ musi mieć charakter stabilny. Jeśli nastąpi zmniejszenie uchybu napięcia, skutkujące zmianą sygnału $w = 0$, naliczony czas opóźnienia „cofa się” oddalając w czasie moment ewentualnego przełączenia zaczeput (zliczając w górę aż do wartości początkowej). Tryb opóźnienia może być zależny od wartości uchybu napięcia lub stały. W trybie niezależnym od uchybu napięcia sygnał uchybu nie jest wykorzystywany (linia przerywana na rys. 5). Blok ten ma dodatkową funkcję – szybką redukcję wysokiego napięcia. Polega ona na wystawieniu sygnału w kierunku zmniejszenia napięcia bez opóźnienia, gdy uchyb napięcia przekracza określoną parametrem wartość. Ma to chronić urządzenia przyłączone do sieci, gdy w sposób skokowy pojawiło się za wysokie napięcie spowodowane np. awaryjnym odłączeniem obciążonej linii. Sygnałami wyjściowymi są wartości zwiększ U lub zmniejsz U wypracowane na podstawie uchybu trwającego przez dłuższy czas, a nie na podstawie wartości chwilowych. Sygnały te przekazywane są do bloku blokad.

Blok blokad realizuje szereg zabezpieczeń (tabela 2) oraz blokadę sterowania zewnętrznego i awarii układu pomiarowego.



Rys. 6. Przekaznik trójpołożeniowy z martwą strefą $2\Delta U$ i histerezą e
Fig. 6. Three-position relay with dead zone $2\Delta U$ and hysteresis e

W przypadku sterowania zewnętrznego sygnały sterujące przełącznikiem zaczeput nie są generowane przez regulator, lecz przesyłane do wyjść. Sygnały zmniejsz U i zwiększ U w zależności od kierunku sterowania PPZ są konwertowane na sygnały zwiększ nr zaczeput i zmniejsz nr zaczeput. Pomiar prądu wykorzystywany jest do realizacji blokady przeciążeniowej. Pomiar numeru zaczeput jest wykorzystywany do realizacji blokad od skrajnych zaczeput. Pomiar napięcia wykorzystywany jest przez blokadę pod- i nadnapięciowe. Sygnałami wyjściowymi są ostateczne decyzje dot. zwiększenia, zmniejszenia napięcia albo pracy na aktualny zaczeput.

Ostatnim blokiem jest układ wyjściowy. Jego zadaniem jest uruchamianie przekaźników wyjściowych na podstawie sygnałów z bloku blokad (tryb automatyczny autonomiczny) albo sygnałów wewnętrznych. Regulator wyłącza przekaźnik wyjściowy, gdy:

- stwierdzone zostanie zadziałanie PPZ (zmiana numeru zaczeput albo sygnał biegu motoru przełącznika) albo
- przekroczony zostanie maksymalny czas na dokonanie zmiany zaczeput.

5. Sygnały wejściowe i wyjściowe modelu regulatora przełącznika zaczeput

Schemat bloku regulatora z sygnałami wejściowymi i wyjściowymi zaprezentowano na rys. 7. Definicje sygnałów bloku regulatora przedstawiono w tabelach 3–5.

Tabela 2. Kierunki blokowania przełącznika zacze- pów przy wystąpieniu blokady

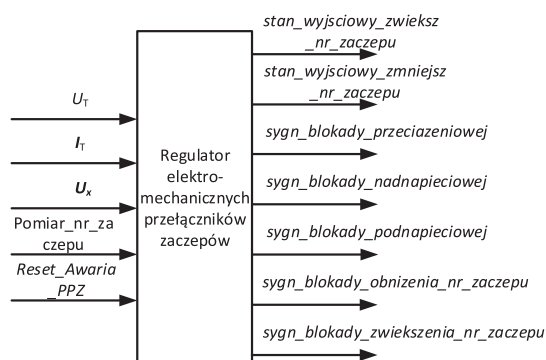
Table 2. Directions of blocking the tap-changer when blocking occurs

Nazwa blokady	Opis	Kierunek blokowania PPZ
Nadnapięciowa ($U >$)	Jest aktywowana, gdy napięcie U_T przekracza nastawę. Możliwy zakres nastawy 80–120% U_n .	W kierunku zwiększenia napięcia dolnego („w górę”)
Podnapięciowa ($U <$)	Jest aktywowana, gdy napięcie U_T jest poniżej nastawy. Możliwy zakres nastawy 80–120% U_n .	W kierunku zwiększenia („w górę”) oraz w kierunku zmniejszenia („w dół”) napięcia dolnego
Przeciążeniowa ($S >$)	Jest aktywowana, gdy wartość przeciążenia przekracza nastawę. Możliwy zakres nastaw 50–110% S_n	W kierunku zwiększenia („w górę”) oraz w kierunku zmniejszenia („w dół”) napięcia dolnego
Od skrajnego górnego położenia zacze- pu ($Z >$)	Jest aktywowana, gdy aktualnym numerem zacze- pu jest ostatni zacze- p	W kierunku zwiększenia numeru zacze- pu
Od skrajnego dolnego położenia zacze- pu ($Z <$)	Jest aktywowana, gdy aktualnym numerem zacze- pu jest 1	W kierunku zmniejszenia numeru zacze- pu

Tabela 3. Sygnały wejściowe regulatora przełączników zacze- pów transformatora WN/SN

Table 3. Input signals of the HV/MV transformer tap-changer controller

Lp.	Symbol	Opis
1	U_T	Wartość skuteczna napięcia międzyfazowego mierzona po stronie SN – wielkość regulowana. W regulatorach zazwyczaj stosuje się dwa układy pomiarowe (podstawowy i kontrolny). Jeśli różnica z obu układów przekracza zadany próg, generowany jest alarm
2	I_T	Wartość skuteczna prądu wybranej fazy mierzona pośrednio (przez przekładnik prądowy)
3	U_x	Wartość zadana napięcia międzyfazowego po stronie SN
4	<i>pomiar_nr_zacze- pu</i>	Wartość analogowa odpowiadająca aktualnemu numerowi zacze- pu. W rzeczywistym układzie występuje w zależności od metody pomiaru numeru zacze- pów pewna liczba wejść binarnych. W niektórych układach może być dostępny tylko sygnał
5	<i>Reset_Awaria_PPZ</i>	Sygnał odwołujący alarm spowodowany brakiem reakcji przełącznika zacze- pów w określonym czasie na sygnał zmiany zacze- pu



Rys. 7. Regulator klasycznego przełącznika zacze- pów – sygnały wejściowe i wyjściowe

Fig. 7. Classic tap-changer controller – input and output signals

Sygnałami wyjściowymi są oprócz sygnałów sterujących stany blokad (tabela 5). Sygnały wejściowe (tabela 3) są zgodne z widocznymi na rys. 4 i 5. Jako dodatkowe wejście wprowadzono *Reset_Awaria_PPZ*. Jest to wejście, które ma służyć do kasowania alarmu spowodowanego brakiem zmiany zacze- pu w określonym parametrem czasie. W rzeczywistym regulatorze reset następuje po zmianie trybu pracy regulatora na R, zablo-

kowaniu regulatora sygnałem dwustanowym lub wyłączeniem regulacji napięcia w regulatorze. Model nie obsługuje innych trybów pracy jak automatyczny z włączoną regulacją napięcia.

6. Założenia i wymagania dla modelu regulatora

Celem pracy było zdefiniowanie założeń i wymagań dla modelu oraz identyfikacja zestawu parametrów, sygnałów wejściowych i wyjściowych. W modelu zastosowano następujące uproszczenia:

- Model nie przewiduje pracy równoległej transformatorów – ze względu na fakt wzrostu mocy zwarciowej operatorzy sieci niezwykle rzadko decydują się na taki układ pracy.
- W modelu nie zaimplementowano mechanizmu kontroli poprawności wprowadzonych przez użytkownika nastaw. Zakłada się, że użytkownik modelu wprowadzi poprawne dane konfiguracyjne. W regulatorach funkcję walidacji parametrów realizuje aplikacja obsługująca menu regulatora (interfejs użytkownika).
- W modelu zaimplementowano tylko tryb automatyczny autonomiczny. Pozostałe tryby nie dotyczą regulacji napięcia.
- W modelu nie uwzględniono możliwości zastosowania czterech konfiguracji (zestawów parametrów) dla różnych stref czasowych. Badania są prowadzone dla konkretnych wartości

Tabela 4. Parametry regulatora przełączników zacze­pów transformatora WN/SN

Table 4. Parameters of the HV / MV transformer tap-changer controller

Lp.	Symbol	Opis
1	S_n	Moc znamionowa przełącznika zacze­pów. Parametr wykorzystywany przez blokadę przeciążeniową.
2	<i>nastawa_blokady_S</i>	Parametr wskazuje wielkość przeciążenia (o ile procent mocy znamionowej S_n), jaka jest wykrywana przez blokadę przeciążeniową.
3	<i>wartosc_graniczna_uchybu</i>	Jest to wartość uchybu, przy której bezzwłocznie następuje przełączenie zacze­pu w kierunku zmniejszenia napięcia SN ze względu na zagrożenia stwarzane przez zbyt wysokie napięcie.
4	<i>Z_plus_U_plus</i>	Parametr wskazuje kierunek regulacji. Wartość 1 oznacza, że wzrost numeru zacze­pu skutkuje wzrostem napięcia SN. Kierunek regulacji zależy od miejsca instalacji przełącznika zacze­pów – uzwojenie górne lub dolne oraz sposobu połączenia uzwojenia regulacyjnego.
5	ΔU	Połowa szerokości martwej strefy (rys. 6).
6	e	Histereza (rys. 6).
7	U_n	Napięcie znamionowe dolne
8	<i>Liczba_Z</i>	Liczba zacze­pów
9	<i>Blokada_U <</i>	Poziom aktywacji blokady podnapięciowej
10	<i>Blokada_U ></i>	Poziom aktywacji blokady nadnapięciowej
11	<i>Typ_reg</i>	Typ regulacji. Określa czy czas opóźnienia zmiany zacze­pu zależy od uchybu napięcia
12	<i>stala_odmierz</i>	Stała odpowiadająca za szybkość odliczania (cofania się) po zmniejszeniu uchybu
13	<i>pocz</i>	Wartość początkowa całki, od której odbywa się odmierzenie czasu opóźnienia zmiany zacze­pu.

Tabela 5. Sygnały wyjściowe regulatora przełączników zacze­pów transformatora WN/SN

Table 5. Output signals of the HV/MV transformer tap changer controller

Lp.	Symbol	Opis
1	<i>stan_wyjsciowy_zwieksz_nr_zacze­pu</i>	Wyjście regulatora – sygnał binarny dla przełącznika zacze­pów – zwiększ numer zacze­pu
2	<i>stan_wyjsciowy_zmniejsz_nr_zacze­pu</i>	Wyjście regulatora – sygnał binarny dla przełącznika zacze­pów – zmniejsz numer zacze­pu
3	<i>sygn_blokady_przeciazeniowej</i>	Sygnalizacja blokady przeciążeniowej
4	<i>sygn_blokady_nadnapieciowej</i>	Sygnalizacja blokady nadnapięciowej
5	<i>sygn_blokady_podnapieciowej</i>	Sygnalizacja blokady podnapięciowej
6	<i>sygn_blokady_obnizenia_nr_zacze­pu</i>	Sygnalizacja blokady zmiany zacze­pu w kierunku zmniejszenia numeru zacze­pu
7	<i>sygn_blokady_zwiekszenia_nr_zacze­pu</i>	Sygnalizacja blokady zmiany zacze­pu w kierunku zwiększenia numeru zacze­pu

parametrów regulacji. Przy zmianie rodzaju sygnału dla szerokości martwej strefy, napięcia zadanego, histerezy z parametru na wejścia, byłyby możliwe realizacji stref czasowych.

- W modelu nie uwzględniono mechanizmów komunikacyjnych, parametrów portów szeregowych oraz komunikacji z systemami nadrzędnymi. W modelu zidentyfikowano sygnały wejściowe i wyjściowe niezależnie od ich pochodzenia (lokalne, zdalne).
- W modelu zrezygnowano z implementacji kompensacji prądowej, gdyż trudno jest wyznaczyć impedancję kompensacji. W praktyce kompensacja prądowa jest wyłączana w regu-

latorach przełączników zacze­pów. W dalszych etapach prac badawczych zostanie zaproponowana nowa metoda kompensacji napięcia.

- W modelu nie uwzględniono funkcji dodatkowych regulatora nieposiadających wpływu na proces regulacji napięcia, m.in. zliczanie liczby zmian zacze­pów, rejestracja przebiegu pracy regulatora. Funkcje te mają sens w rzeczywistym urządzeniu podczas diagnostyki oraz weryfikacji poprawności nastaw.
- W modelu założono, że regulacja napięcia jest zawsze załączona. W rzeczywistych regulatorach możliwe jest zdalne wyłączenie regulacji napięcia i ustawianie sygnałów sterują-

cych do przełącznika zacze-
pów przez dyspozytora, np. z sys-
temu wizualizacji.

Opracowany model symulacyjny ma spełniać następu-
jące wymagania:

- Umożliwić ocenę jakości regulacji napięcia po stronie niższej wg zadanego kryterium.
- Uwzględnić stany przejściowe i zjawiska komutacyjne, ponieważ mają one wpływ na jakość regulacji napięcia.
- Model ma umożliwić symulację pracy transformatora regulacyjnego wraz z regulatorem w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Napięcie zasilające transformator zależy od warunków panujących w sieci WN. Na poziomy napięć w sieci SN i nn mają wpływ wartości mocy czynnych i biernych odbiorców, generacji, konfiguracja sieci, numer zacze-
pów transformatora, napięcie zasilające WN. Model musi uwzględniać te czynniki.
- Uniwersalność. Dzięki zastosowaniu klasycznego modelu Simulink oraz podziału modelu na podsystemy możliwa jest modyfikacja, rozbudowa lub zmiana algorytmu sterowania. Inne narzędzia nie zawsze umożliwiają łatwą edycję istniejących modeli.
- Podsystemy modelu powinny odpowiadać podziałowi na rzeczywiste urządzenia, tj. osobny model regulatora, osobny model transformatora WN/SN i osobny model przełącznika zacze-
pów. Umożliwia to zbadanie wpływu algorytmu sterowania wybranego urządzenia na pracę całego układu.
- Sygnały wejściowe i wyjściowe odpowiadają rzeczywistym sygnałom wejściowym lub wyjściowym regulatora URT lub nastawom istotnym dla algorytmu sterowania.
- Założono, że dostępny jest pomiar numeru zacze-
pów. Układy selsynowe są obecnie rzadko spotykane.

7. Analiza istniejących rozwiązań

W środowisku MATLAB/Simulink dostępna jest biblioteka symulacji fizycznych – Simscape Power System. Zawiera ona bloki reprezentujące maszyny elektryczne, urządzenia energoelektroniczne oraz sieci elektroenergetyczne. Biblioteka ta zawiera blok transformatora regulacyjnego (*Three-Phase OLTC Regulating Transformer – Phasor Type*) wraz z regulatorem. Jednak ten regulator może pracować tylko w trybie opóźnienia niezależnym od uchybu napięcia.

Istnieje wiele modeli regulatorów i przełączników zacze-
pów. Są to jednak bardzo uproszczone modele statyczne. Do celów badań jakości regulacji napięcia wymagane są dokładne modele uwzględniające nieliniowości, działania blokad oraz członów dynamicznych.

8. Wnioski

1. Modele statyczne regulatora przełączników zacze-
pów nie nadają się do badania jakości regulacji napięcia. Wymagana jest budowa dokładnego modelu uwzględniającego nieliniowości oraz zależności czasowe (dynamikę). Nie ma modelu symulacyjnego uwzględniającego nieliniowości, system blokad i kompensację prądową oraz implementujący algorytm rzeczywistego regulatora. Jest on niezbędny w początkowej fazie badań. Wymagane jest opracowanie takiego modelu.
2. Do realizacji badań nowego algorytmu regulatora prze-
łączników zacze-
pów wymagane jest opracowanie modeli uwzględniających nieliniowości i dynamikę urządzeń rzeczywistych, tj. regulatora, przełącznika zacze-
pów i transformatora oraz sieci elektroenergetycznej. Jest to spowodowane tym, że wszystkie te elementy łącznie mają wpływ na jakość regulacji napięcia. Wówczas możliwe jest porównanie

jakości regulacji napięcia za pomocą regulatora nowego typu oraz klasycznego.

3. Istnieje model regulatora przełącznika zacze-
pów w środowisku MATLAB/Simulink – biblioteka Simscape Power System. Jednak ten model jest bardzo uproszczony. Model regulatora ma blok opóźnienia z charakterystyką niezależną do wartości uchybu. W praktyce stosuje się jednak najczęściej charakterystykę opóźnienia zależną od wartości uchybu.
4. Symulacja sieci elektroenergetycznej z transformatorem regu-
lacyjnym WN/SN o zmiennej wartości skutecznej napięcia zasilania, zmiennym zapotrzebowaniu na moc po stronie sieci SN, zbudowanym w bibliotece Simscape Power System traci zbieżność. Wówczas wyniki mogą być obciążone błędami. Krok symulacji staje się coraz mniejszy, a sama symulacja trwa niedopuszczalnie długo lub kończy się błędem.
5. Wybrano uniwersalne narzędzie do przygotowania modelu i przeprowadzenia badań – MATLAB/Simulink. Środowisko to umożliwia symulację zjawisk komutacyjnych, które mają istotny wpływ na jakość regulacji napięcia. Ponadto środowisko Simulink umożliwia jego rozbudowę m.in. za pomocą S-Function,Fcn, MATLAB Function. Pozwala to na tworzenie nowych bloków oraz uruchamianie innych bibliotek, np. do analiz sieci elektroenergetycznych z poziomu modelu. Dodatkowe biblioteki Simulink umożliwiają szybkie prototypowanie nowego regulatora na wielu platformach sprzętowych.
6. Zastosowanie kompensacji prądowej wymaga dodatkowych badań. W modelu pominięto ten element ze względu na problemy przy wyznaczeniu impedancji kompensacji. Zastosowanie algorytmu spadku na wielu liniach zasilających wymaga zastosowania opomiarowania sieci SN (pomiar prądów poszczególnych linii SN w stacji GPZ, pomiar napięć w wybranych węzłach sieci). Analiza układów kompensacji i ich skuteczności pozwoli na opracowanie nowego układu pomiarowego regulatora.
7. Każdy projekt, w tym model techniczny, powinien mieć sprecyzowane wymagania oraz założenia. Modele symulacyjne tworzone są w konkretnym celu. Wyprecyzowanie wymagań oraz założeń umożliwia weryfikację otrzymanego modelu.

Bibliografia

1. Powroźnik M., *Nowe algorytmy regulacji napięcia i mocy biernej stosowane w układach ARNE/ARST dla autotransformatorów pracujących w przyelektrownianych stacjach elektroenergetycznych najwyższych napięć. Część 2. Kryteria regulacji A i R*, „Przebieg Elektrotechniczny”, R. 93, Nr 8, 2017, 169–174, DOI: 10.15199/48.2017.08.44.
2. Brusilowicz B., Szafran J., *Badanie wpływu działania prze-
łącznika zacze-
pów transformatora na stabilność napięciową*, „Przebieg Elektrotechniczny”, R. 90, Nr 3, 2014, 90–93, DOI: 10.12915/pe.2014.03.18.
3. Machowski J., Kacejko P., *Influence of automatic control of a tap changing step-up transformer on power capability area of generating unit*, “Electric Power System Research”, Vol. 140, 2016, 46–53, DOI: 10.1016/j.epsr.2016.06.044.
4. Machowski J., *Regulacja i stabilność systemu elektroenerge-
tycznego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
5. Powroźnik M., Kołodziej D., *Nowe algorytmy regulacji napię-
cia i mocy biernej stosowane w układach ARNE/ARST dla autotransformatorów pracujących w przyelektrownianych stacjach elektroenergetycznych najwyższych napięć. Część 1*, „Przebieg Elektrotechniczny”, R. 89, Nr 11, 2013, 125–128.
6. Korpikiewicz J., *New possibility of full electronic tap-changer control in HV/MV transformers*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej”, Nr 53, 2017, 125–128.

7. Korpikiewicz J., Mysiak P., *Voltage stability and control tap-changer of power transformer*, "Scientific Journal of Gdynia Maritime University", Vol. 98, 2017, 100–108.
8. Korpikiewicz J., Mysiak P., *Classical and solid-state tap-changers of HV/MV regulating transformers and their regulators*, "Acta Energetica", Nr 3, 2017, 110–117, DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2017309.
9. Szczerba Z., *Czy stosować blokadę napięciową transformatorów 11/SN?*, X Ogólnopolska Konferencja Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce. Komitet Automatyki Elektroenergetycznej SEP, Nałęczów, 2007.
10. Małkowski R., Szczerba Z., *Adaptacyjny algorytm regulacji transformatorów zasilających sieć rozdzielczą*, "Acta Energetica", Nr 2, 2010, 27–33.
11. Małkowski R., Szczerba Z., Zbroński A., *Analiza możliwości koordynacji algorytmów działania regulatora transformatora blokowego i regulatora generatora*, "Acta Energetica", Nr 3, 2011, 35–42.
12. Chen N., Jonsson L.E., *A new Hybrid power electronics on-load tap changer for power transformer*, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015 IEEE, 1030–1037, DOI: 10.1109/APEC.2015.7104475.
13. Abu-Siada A., Islam S., Mohamed E., *Application of artificial neural networks to improve power transfer capability through OLTC*, "International Journal of Engineering, Science and Technology", Vol. 2, No. 3, 2010, 8–18.
14. Ram G., Prasanth V., Bauer P., Barthlein E.-M., *Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014, 918–923, DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980624.
15. Wang Y., Gao P., Dong E., Liu Z., Zou J., Xuansh C., *Intelligent control of on-load tap changer of transformer*, 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST), 178–181, DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2011.6122963.
16. Faiz J., Javidnia H., *Fast Response Solid-State On Load Transformers Tap-Changer*, Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, 2008, 355–359, DOI: 10.1049/cp:20000272.
17. Faiz J., Siahkolah B., *Differences Between Conventional and Electronic Tap-Changers and Modifications of Controller*, "IEEE Transactions on Power Delivery", Vol. 21, Iss. 3, 2006, 1342–1349, DOI: 10.1109/TPWRD.2005.861323.
18. Faiz J., Siahkolah B., *Electronic tap-changer for distribution transformers*. Berlin: Springer-Verlag, 2011.
19. Faiz J., Siahkolah B., *New Controller for an Electronic Tap Changer-Part I: Design Procedure and Simulation Results*, "IEEE Transactions on Power Delivery", Vol. 22, Iss. 1, 2007, 223–229, DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881424.
20. Faiz J., Siahkolah B., *New Solid-State on-Load Tap-Changer Topology for Distribution Transformers*, "IEEE Power Engineering Review", Vol. 22, Iss. 8, 2002, 71–71, DOI: 10.1109/MPER.2002.4312524.
21. Castro J., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoir L., *Coordinated Voltage Control in Distribution Network with the Presence of DGs and Variable Loads Using Pareto and Fuzzy Logic*, "Energies", Vol. 9, No. 2, 2016, 107, DOI: 10.3390/en9020107.
22. Larsson M., *Coordination of cascaded tap changers using a fuzzy-rule-based controller*, "Fuzzy Sets and Systems", Vol. 102, Iss. 1, 1999, 113–123, DOI: 10.1016/S0165-0114(98)00208-5.
23. Kyryk V.V., Haatiuk O.S., *Fuzzy Logic Controller For On-Load Transformer Tap Changer For Distribution Network With Distributed Generation*, Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 2014.
24. Kołodziej D., Jemieliuty J., *Układ regulacji transformatorowej typu URT. Dokumentacja techniczno-ruchowa*. Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, 2012.
25. Czaplą Ł., Ogryczak T., *System zarządzania napięciem i mocą bierną obszaru sieci inteligentnej (Smart Grid)*, „Elektro.Info”, No. 7–8, 2012.

Construction of a Simulation Model of the HV/MV Transformer Tap-Changer Controller – Assumptions and Requirements

Abstract: The article presents the voltage regulation system on the MV side of the 110 kV/15 kV station. The direction of voltage control depends on the place of installation of the tap changer and the method of switching on the control winding. The disturbing quantities in this system are changes in the voltage supplying the transformer, changes in the demand and generation balance in MV and LV networks. The construction and algorithm of the tap changer controller operation are presented on the example of the URT regulator. Requirements and assumptions for the simulation model created in Simulink were identified. The model was built to carry out simulation studies on the influence of the controller's algorithm/construction on the quality of MV voltage regulation. In addition, this model will allow to assess the impact of unsteered sources connected to MV or LV networks on the quality of voltage regulation in these networks.

Keywords: OLTC, simulation model of the tap-changer controller, voltage regulation in the MV network

mgr inż. Jarosław Grzegorz Korpikiewicz

j.korpikiewicz@ien.gda.pl

Ukończył studia magisterskie na kierunku automatyka i robotyka na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2002 r.). Pracował w przemyśle jako automatyk oraz informatyk. Obecnie zatrudniony jest w gdańskim oddziale Instytutu Energetyki na stanowisku specjalisty. Jego zainteresowania obejmują zastosowania metod sztucznej inteligencji w elektroenergetyce, regulację napięcia w stacji elektroenergetycznej, badania i implementację logiki rozmytej w systemach wbudowanych, projektowanie regulatorów. Ponadto zajmuje się energetyką odnawialną oraz magazynami energii (Smart Grid). Doktorant w Katedrze Automatyki Okrętowej Wydziału Elektrycznego Akademii Morskiej w Gdyni. Jest członkiem zarządu koła nr 60 Gdańskiego Oddziału Stowarzyszenia Elektryków Polskich (SEP). Jest członkiem Gdańskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (PTETiS).

