

Budowa modelu symulacyjnego regulatora przełączników zaczepów transformatora WN/SN – kompensacja prądowa

Jarosław Grzegorz Korpikiewicz

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

Streszczenie: W artykule poruszono problem realizacji kompensacji prądowej w regulatorach przełączników zaczepów transformatora. Przedstawiono strukturę regulatora przełącznika zaczepów transformatora WN/SN. Szczegółowo opisano układ pomiarowy wraz z układem kompensacji prądowej. Zaproponowano nową realizację kompensacji prądowej. Utworzono w środowisku MATLAB/Simulink model symulacyjny analizowanej części regulatora do testów. Zaprezentowano wyniki testów potwierdzające poprawność pracy utworzonego modelu. Zaproponowano koncepcję nowej metody kompensacji prądowej uwzględniającą pomiary trójfazowej sieci elektroenergetycznej.

Słowa kluczowe: model symulacyjny regulatora przełącznika zaczepów, regulacja napięcia w sieci SN, kompensacja prądowa

1. Wprowadzenie

Regulacja napięcia jest nadal aktualnym problemem, zwłaszcza przy wysokim udziale generacji OZE. Istotnym czynnikiem w regulatorach napięcia jest kompensacja prądowa [1, 2]. Stosowana jest zarówno w regulatorach generatorów synchronicznych jak i regulatorach przełączników zaczepów transformatora. Typowa jej realizacja dla transformatorów regulacyjnych w stacjach WN/SN wykorzystuje napięcie strony niższej transformatora oraz sumę prądów obciążeń. Jej podstawowym celem jest korekta napięcia o spadek wywołany przez prąd obciążenia przepływający przez impedancję kompensacji. Przy prawidłowym doborze parametrów kompensacji pozwala zmniejszyć wpływ obciążenia na wartość napięcia w głębi sieci. Skutkuje to zatem „usztwinieniem napięć” w sieci oraz poprawia jakość regulacji napięcia. Jednak podczas jej realizacji występują zagadnienia do rozwiązania:

- problem wyznaczenia impedancji kompensacji. Układy sieci rozdzielczych są złożone, dlatego trudno jest dobrać parametry kompensacji dla większości realnych przypadków, tym bardziej, że zmieniają się one w wyniku działania szeregu czynników, związanych z pogodą i obciążeniem poszczególnych linii, zbiorem aktualnie pracujących odbiorców, źródeł i stopnia ich obciążenia. Problemem jest wyznaczenie centrum obciążenia, które może nie istnieć, przez co należałoby

często korygować wartość impedancji kompensacji, stosownie do aktualnych profili obciążeń linii zasilających. W praktyce funkcja kompensacji jest wyłączona w regulatorach, a prawidłowy poziom napięć u odbiorców zapewnia się przez podwyższenie napięcia zadanego do górnej połowy zakresu regulacji, tj. między wartością U_n a wartością $1,1 \cdot U_n$ [3];

- problemem jest fakt zróżnicowania zarówno jak i budowy oraz obciążenia poszczególnych linii wychodzących z GPZ (Głównego Punktu Zasilania). Powoduje to różne wartości spadków i strat napięcia na poszczególnych liniach zasilanych z GPZ. Może to skutkować tym, że wartość napięcia u części odbiorców nie będzie spełniała wymagań jakościowych. Z tego też względu w literaturze proponuje się zastosowanie kompensacji spadku napięcia na wielu liniach zasilających MLDC (ang. *Multiple Line Drop Compensation*) [4–6];
- wzrost udziału generacji rozproszonej o niesterowanej generowanej mocy powoduje wzrost zmienności charakterystyk obciążenia, dynamiczne zmiany napięcia spowodowane zmianami mocy czynnej, możliwą zmianę kierunków przepływu mocy. Skutkuje to pogorszeniem jakości regulacji napięcia oraz konieczność zastosowania nowych rozwiązań spełniających dodatkowe wymagania.

W pracach [4–7] zaprezentowano algorytm kompensacji spadku napięcia na wielu liniach zasilających MLDC (ang. *Multiple Line Drop Compensation*). Algorytm ten uwzględnia zróżnicowane obciążenia poszczególnych linii SN zasilanych z GPZ. Obecnie dostępne komercyjne regulatory nie implementują algorytmu sterowania z MLDC.

Stacje 110 kV/SN wyposażone są w transformator o układzie połączeń najczęściej – Yd. Przełączniki zaczepów montowane są po stronie wyższego napięcia. Końce uzwojeń regulacyjnych stanowią punkt gwiazdowy. Strona średniego napięcia jest połączona w trójkąt, zatem sieci SN nie mają przewodu neutralnego. Ma to wpływ na układ pomiarowy parametrów sieci elektroenergetycznej.

Autor korespondujący:

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

Artykuł recenzowany

nadesłany 23.05.2018 r., przyjęty do druku 29.08.2018 r.



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

2. Struktura regulatora przełączników zaczełów transformatora WN/SN

Zasadę działania regulatora PPZ przedstawiono m.in. w [1, 2, 8]. W regulatorze do kompensacji prądowej wykorzystano pomiary napięć i pozostałych wielkości ze wszystkich faz. Wynika to z założenia, że w sieci SN mogą również wystąpić asymetrie napięć i obciążeń. Może to powodować błędne działanie układu przy pomiarze napięcia jednej fazy. Na rysunku 1 przedstawiono nowy schemat blokowy i przepływ sygnałów między blokami. Część zewnętrzna pomiarowa została oznaczona niebieską linią przerywaną. Służy ona do realizacji pomiarów parametrów sieci średniego napięcia. Część wewnętrzna pomiarowa została zaznaczona czerwoną linią przerywaną. Połączenie między zewnętrzną a wewnętrzną częścią pomiarową, ze względu na dużą liczbę przesyłanych parametrów, odbywa się za pomocą złącza cyfrowego. Sygnały oraz elementy schematu szczegółowo przedstawiono w [8]. W dalszej części zostanie przeanalizowana kompensacja prądowa. Na jej podstawie zostanie utworzony nowy blok modelu symulacyjnego.

3. Układ kompensacji prądowej

Układy kompensacji prądowej stosowane są głównie przez regulator napięcia generatora synchronicznego [1, p. 60], [2, 9, 10]. Kompensacją prądową regulatora napięcia nazywa się liniowe uzależnienie wartości zadanej modułu napięcia od składowej czynnej i biernej prądu obciążenia [2]. Kompensację prądową stosuje się w celu kompensacji zmian spadków/strat napięcia spowodowanych zmiennym obciążeniem elementów sieci oraz zapewnienia prawidłową współpracę kilku generatorów lub transformatorów. Współpraca równoległa grupy generatorów jest prawidłowa, gdy:

- nie występują prądy wyrównawcze pomiędzy generatorami przy biegu jałowym grupy,
- odpowiednie obciążanie się grupy generatorów mocą bierną np. proporcjonalnie do mocy znamionowej,
- grupa generatorów musi być wewnętrznie stabilna [2, p. 165].

Drugi warunek jest spełniany przez dobór reaktancji zastępczych. Równoległa praca transformatorów jest wykorzystywana rzadko, ze względu na wzrost mocy zwarciowej oraz wymagań dla aparatury łączeniowej i zabezpieczającej. Jednak powszechnie występują regulatory przełączników umożliwiające równoległą pracę kilku transformatorów.

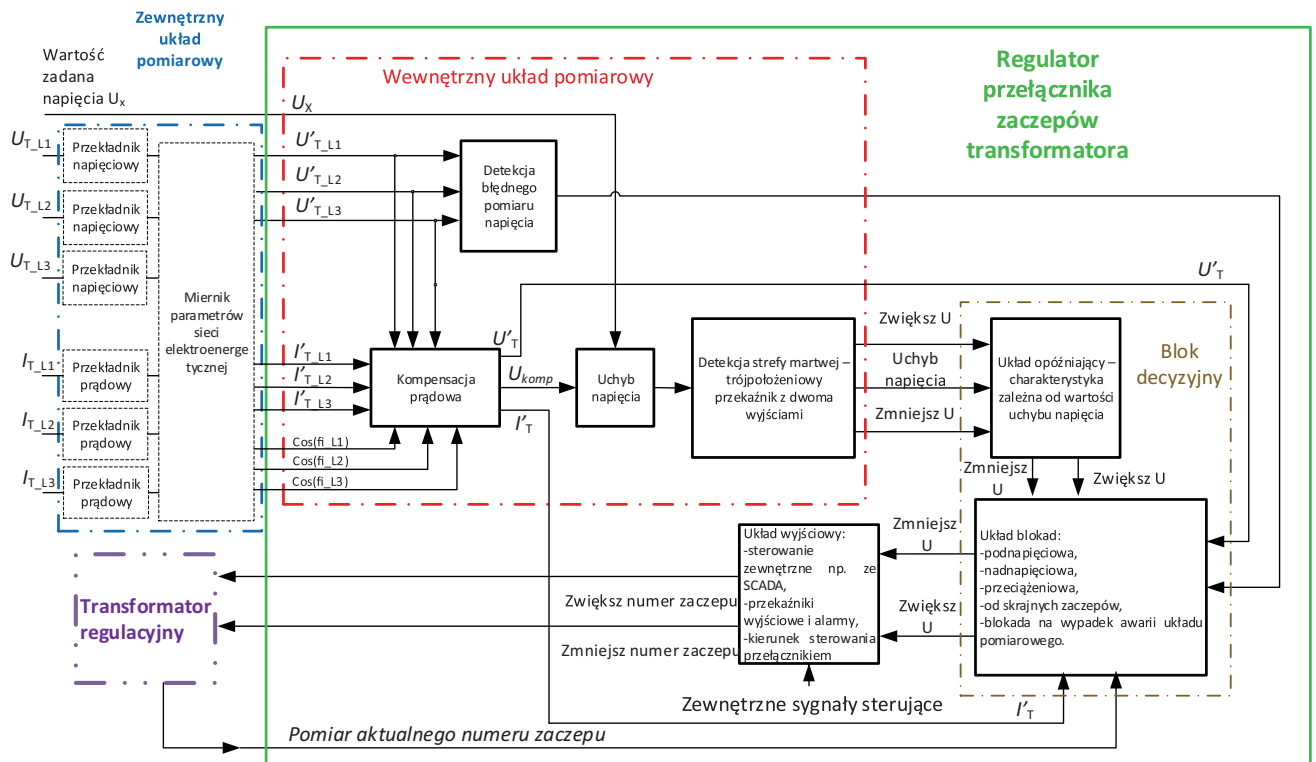
W artykule [10] zaprezentowano wpływ kompensacji prądowej na utrzymanie napięcia za transformatorem blokowym oraz wpływ kompensacji prądowej na wrażliwość zmian mocy biernej generatora przy zmianach napięcia w sieci. Zależność kompensacji prądowej generatora przedstawiona jest wzorem (1) [2, 11]:

$$U_{komp} = \left| \underline{U}_g - \underline{Z}_{komp} \cdot \underline{I} \right| \quad (1)$$

gdzie: U_{komp} – napięcie kompensacji, U_g – zespolone napięcie generatora, Z_{komp} – zespolona impedancja kompensacji = $R_{komp} + jX_{komp}$, I – zespolony prąd obciążenia generatora.

Zastosowanie kompensacji w regulatorach napięcia generatorów systemowych usztywnia napięcia w sieci i w rezultacie poprawia jakość regulacji napięcia w zakresie zmienności szybszej niż oddziaływanie układów wtórnej regulacji napięć typu ARNE. Kompensacja ma również pozytywny wpływ na stabilność napięciową przez zwiększenie zaangażowania w regulację napięcia generatorów poza obszarem wzrostu zapotrzebowania [9].

Jest ona również implementowana w regulatorach przełączników zaczełów. Celem kompensacji prądowej jest utrzymanie



Rys. 1. Schemat blokowy regulatora przełącznika zaczełów transformatora WN/SN z wykorzystaniem pomiarów trójfazowych
Fig. 1. Block diagram of the HV/MV transformer tap changer controller using three-phase measurements

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_L1} oraz spadku/straty napięcia na impedancji kompensacji uzyskujemy napięcie kompensacji U_{komp} (2). Wielkości R_{komp} i X_{komp} są parametrami ustawianymi przez użytkownika.

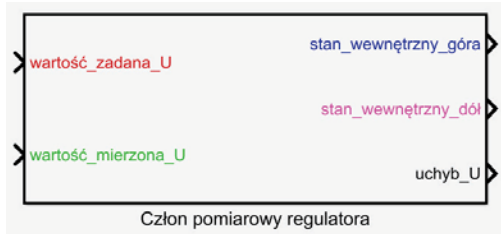
$$U_{komp} = U_{T_L1} - (R_{komp} \cdot I_{T_L1_re} - X_{komp} \cdot I_{T_L1_im}) \quad (2a)$$

lub

$$U_{komp} = \left| U_{T_L1} - \left[(R_{komp} \cdot I_{T_L1_re} - X_{komp} \cdot I_{T_L1_im}) + j(R_{komp} \cdot I_{T_L1_im} + X_{komp} \cdot I_{T_L1_re}) \right] \right| \quad (2b)$$

gdzie: R_{komp} – rezystancja kompensacji, X_{komp} – reaktancja kompensacji, U_{komp} – napięcie kompensacji. I_{T_L1} – wartość skuteczna prądu, np. fazy pierwszej po stronie niższego napięcia, I_{T_L1} – zespolony prąd transformatora (składowa czynna $I_{T_L1_re}$, składowa bierna $I_{T_L1_im}$).

W dawnych układach analogowych realizowano kompensację wg wzoru (2b). Obecnie regulatory są urządzeniami cyfrowymi, w których kompensacja prądowa jest realizowana wg wzoru (2a) [10]. Najnowsze urządzenia programowalne umożliwiają implementację wg (2a). Jednak w eksploatacji występuje problem w wyznaczeniu parametrów kompensacji (R_{komp} , X_{komp}). Niestety układy sieci rozdzielczych są złożone, dlatego trudno jest dobrać te parametry dla większości realnych przypadków, tym bardziej, że zmieniają się one w wyniku działania szeregu czynników, związanych z pogodą i obciążeniem poszczególnych linii [3].



Rys. 2. Blok członu pomiarowego regulatora i detekcji martwej strefy bez kompensacji prądowej

Fig. 2. Block of the controller measuring unit and detection of the dead zone without current compensation

Porównując wartości skuteczne U_{komp} i wartość zadaną U_x uzyskujemy uchyb napięcia ϵ_u (3).

$$\epsilon_u = U_x - U_{komp} \quad (3)$$

Ograniczona wartość bezwzględna uchybu (4) jest dopuszczalna, ponieważ napięcie zasilania powinno się mieścić w określonych granicach wokół wartości znamionowej, np. $(0,9-1,1) \cdot U_n$,

$$|\epsilon_u| < \Delta U \quad (4)$$

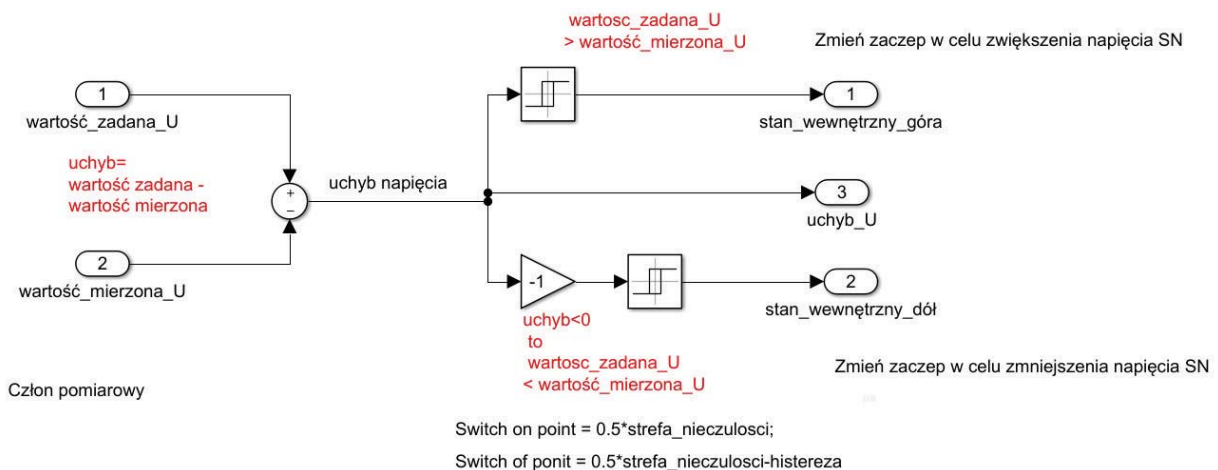
Regulacja napięcia za pomocą przełącznika zaczeów jest skokowa. Opis matematyczny bloku – detekcja strefy martwej (przekaznika trójpołożeniowego z martwą strefą $2\Delta U$ oraz histereza e) jest następujący (5):

$$w(t) = \begin{cases} -1, & \epsilon_u \leq -\Delta U \\ 0, & \epsilon_u \in (-\Delta U + e \div +\Delta U - e) \\ +1, & \epsilon_u \geq +\Delta U \\ w(t-1), & \epsilon_u \in (-\Delta U \div \Delta U + e) \cup (+\Delta U - e \div +\Delta U) \end{cases} \quad (5)$$

4. Model bloku pomiarowego bez kompensacji prądowej

Budowa modelu tych członów jest prosta (rys. 3). W modelu zrezygnowano z układu pomiaru napięcia kontrolnego. Układy pomiaru napięcia/prądu przemiennego będą modelowane jako bloki przyłączone do wejść członu pomiarowego. Będą one modelowały przekładniki napięciowe lub prądowe, układy pośredniczące, przetworniki analogowo-cyfrowe. Umożliwi to testowanie wpływu budowy układu pomiaru napięcia lub prądu przemiennego na pracę regulatora. Na rysunku 4 przedstawiono widok podsystemu w środowisku MATLAB/Simulink realizujący omawiane bloki regulatora.

Człon pomiarowy po podjęciu decyzji o nieimplementowaniu kompensacji prądowej redukuje się do węzła sumacyjnego (rys. 3). Przekaznik trójpołożeniowy został utworzony z dwóch bloków *Relay*. Progi załączania to ΔU , a wyłączania to $\Delta U - e$.

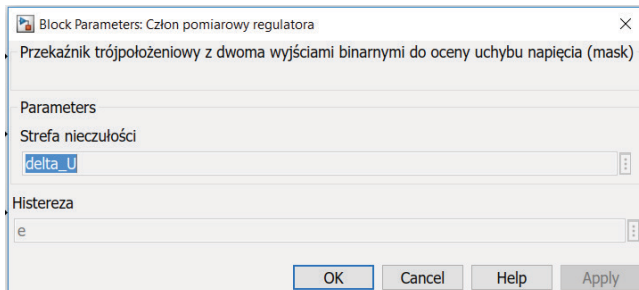


Rys. 3. Model symulacyjny członu pomiarowego bez kompensacji prądowej

Fig. 3. Simulation model of the measuring element without current compensation

Na drugi przekaźnik podany jest ujemny uchyb, gdyż próg załączania nie może być mniejszy od progu wyłączenia. Człon ma trzy wyjścia. Jednym z nich jest uchyb napięcia. Dwa pozostałe to wyjścia przekaźników. Sygnałami wyjściowymi są wartości skuteczne napięcia – zadana i mierzona.

Blok ten ma maskę umożliwiającą ustawianie parametrów. Okno dialogowe z parametrami bloku przedstawiono na rysunku 4.

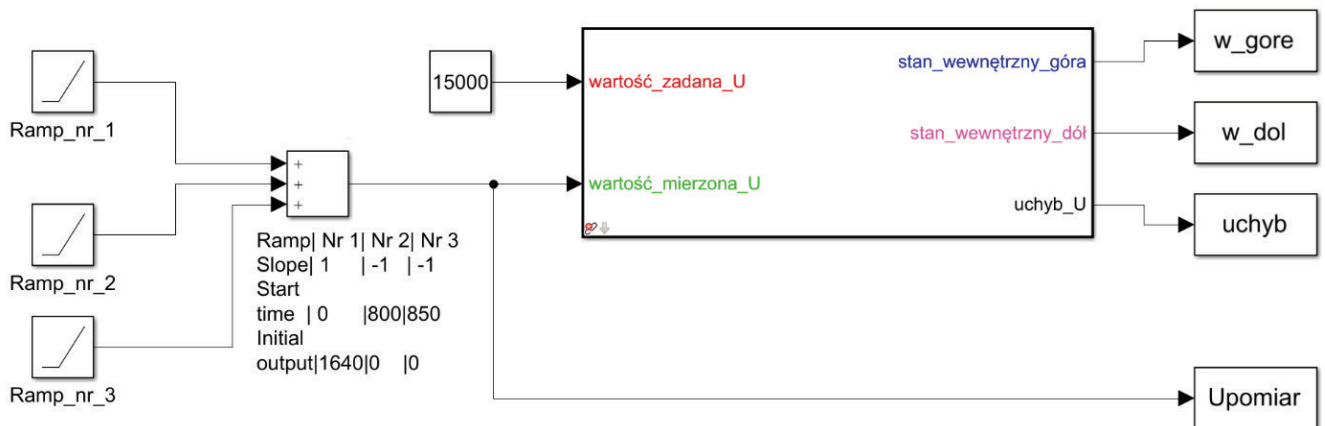


Rys. 4. Okno dialogowe członu pomiarowego regulatora bez kompensacji prądowej

Fig. 4. Dialog box of the controller measuring element without current compensation

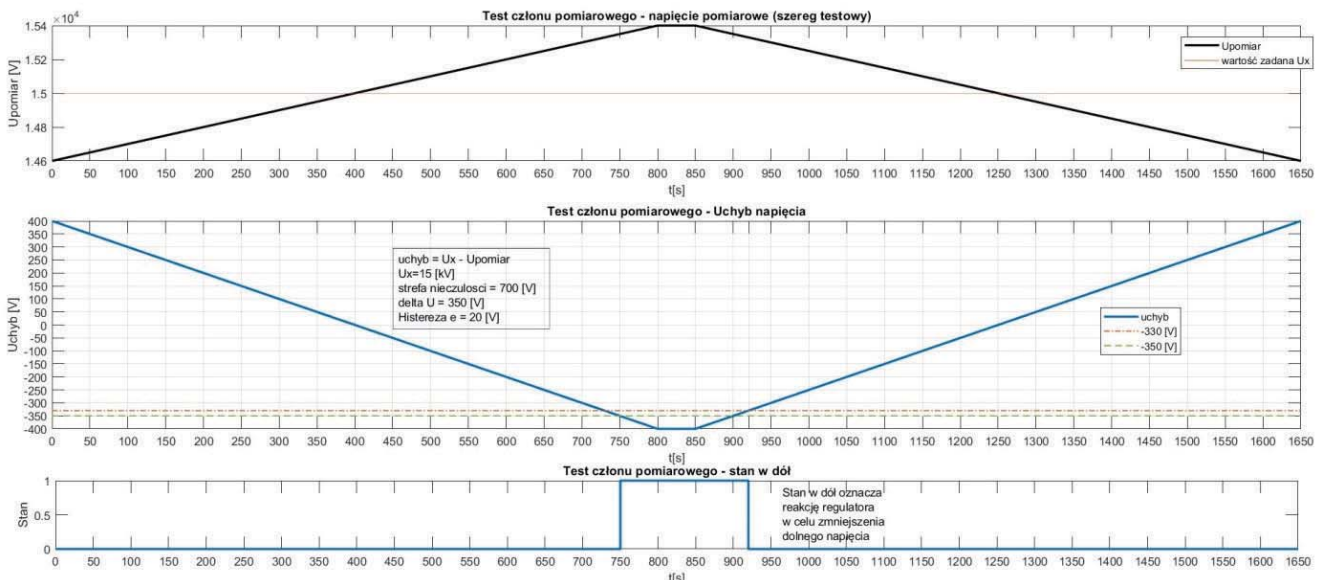
Badanie symulacyjne polegało na utworzeniu sygnału wartości mierzonej napięcia, przy stałej wartości zadanej oraz rejestracji wszystkich sygnałów wyjściowych testowanego bloku. Model symulacyjny do badań zaprezentowano na rys. 5. W celu utworzenia testowego napięcia pomiarowego w kształcie trapezu (górne wykresy rys. 6 i 7) użyto trzech bloków *Ramp* (parametry podano na schemacie) i bloku sumy. Zakres zmian napięcia w stosunku do wartości zadanej wynosi ± 400 V i przekracza wartość $\Delta U = 350$ V. Pozwala to na demonstrację zmiany stanu odpowiedniego wyjścia (rys. 2). Oba wykresy otrzymano podczas jednej próby.

Na górnych wykresach (rys. 6 i 7) przedstawiono napięcie testowe (wartość mierzona) w kształcie trapezu oraz wartość zadaną napięcia. Środkowe wykresy prezentują wartość uchybu oraz progi załączania i wyłączania sygnału wyjściowego. Dla uchybu ujemnego (rys. 6), gdy napięcie mierzone jest większe od wartości zadanej progiem załączania jest wartość uchybu -350 V, a progiem wyłączania sygnału wyjściowego jest wartość uchybu -330 V ($-1 \cdot \Delta U + e$), co potwierdza dolny wykres. Sygnałem wyjściowym jest sygnał zmiany zaczeu zmniejszający napięcie dolnego transformatora. Analogicznie – wyniki dla dodatniego uchybu zaprezentowano na rys. 7. Wyniki testu potwierdzają poprawność pracy tej części modelu regulatora.



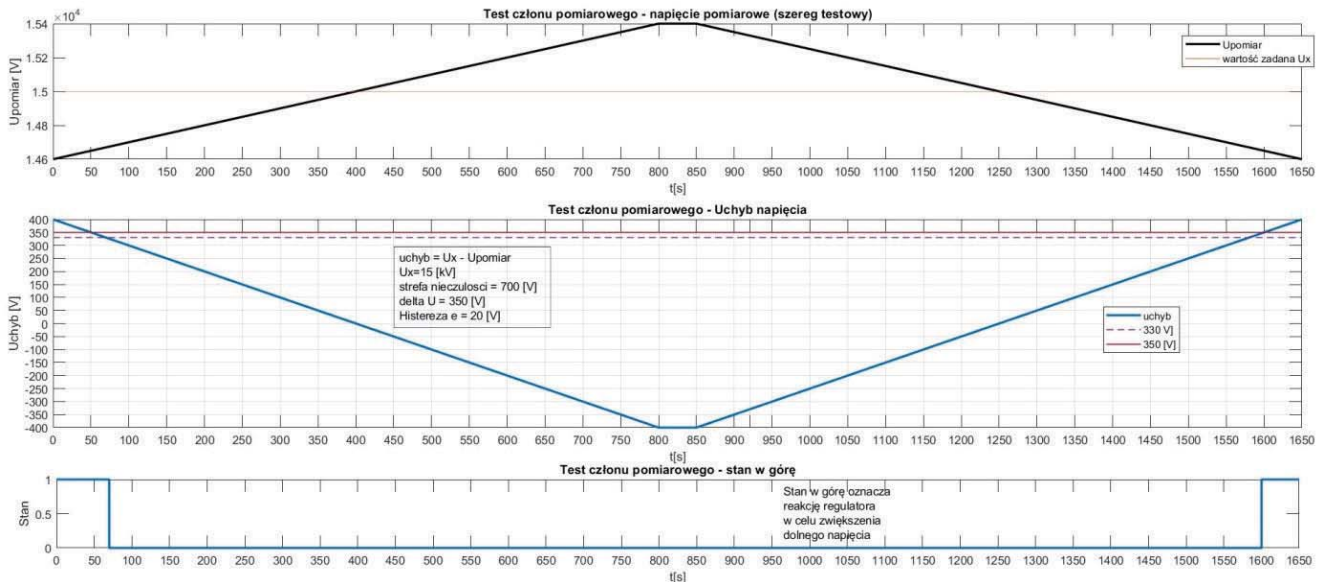
Rys. 5. Schemat symulacyjny do testów członu pomiarowego bez kompensacji prądowej

Fig. 5. Simulation scheme for testing of the measuring element without current compensation



Rys. 6. Wyniki testów członu pomiarowego bez kompensacji prądowej – stan wewnętrzny zmniejsza napięcie

Fig. 6. Test results of the measuring element without current compensation – internal state reduce the voltage



Rys. 7. Wyniki testów członu pomiarowego bez kompensacji prądowej – stan wewnętrzny zwiększ napięcie
Fig. 7. Test results of the measuring element without current compensation – internal state increase the voltage

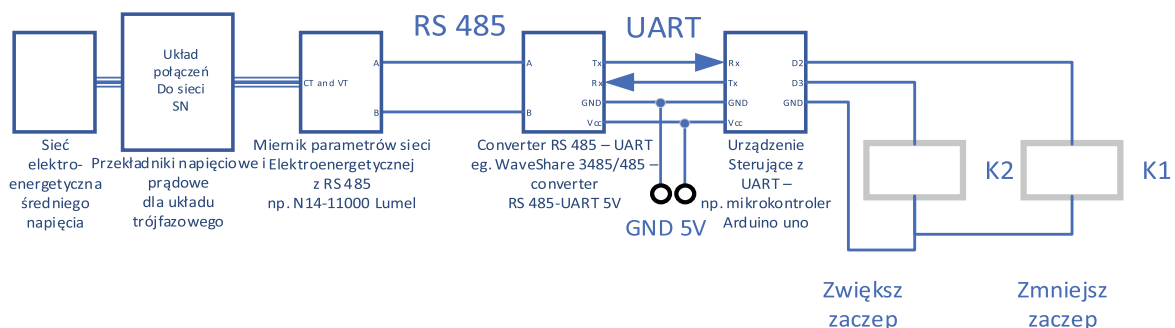
5. Techniczna analiza układu kompensacji prądowej

Napięcie kompensacji jest pomniejszone względem wyniku pomiaru o hipotetyczną stratę napięcia. Wymaga to pomiaru fazona prądu (składowa czynna i bierna). Jednym z możliwych rozwiązań dla przebiegów sinusoidalnych jest pomiar mocy czynnej i wyznaczenie na podstawie istniejących pomiarów wartości skutecznych napięć i prądów mocy pozornej. Na podstawie mocy czynnej i pozornej wyznaczamy współczynnik mocy $\cos\phi$. To już umożliwia wyznaczenie obu składowych.

Sieć nie w każdej chwili jest symetryczna. Zatem do kompensacji napięcia powinny być wykorzystane pomiary trzech napięć i trzech prądów. Uchroni to przed sytuacją, w której wartość napięcia np. U_{L1} jest powyżej znamionowej a w pozostałych znacznie poniżej. Gdyby do pomiaru wykorzystano tylko U_{L1} wówczas regulator po określonym opóźnieniu wystawi sygnał sterujący zmiany zaczeputy w celu zmniejszenia napięcia. Skutkowałoby to pogorszeniem jakości napięcia. Podobnie asymetria może dotyczyć prądów przewodowych. W celu realizacji tych pomiarów można wykorzystać gotowy miernik parametrów sieci elektroenergetycznej trójfazowej, np. firmy Lumel N43 22100P0 [12, 13]. Urządzenia N43 są cyfrowymi przyrządami programowalnym i przeznaczonym do pomiaru i przetwarzania parametrów sieci energetycznych trójfazowych 3- lub

4-przewodowych w układach symetrycznych i niesymetrycznych. Przetwornik/miernik ten mierzy i wylicza m.in. napięcia fazowe i międzyfazowe dla trzech faz, trzy prądy fazowe, moce czynne i bierne fazowe i trójfazowe, co jest wystarczające do realizacji wejściowego układu pomiarowego. Przetwornik ten ma interfejs RS-485 i obsługuje protokół Modbus RTU. RS-485 znajduje się we wszystkich wersjach przetwornika i umożliwia odczyt mierzonych i wyliczanych parametrów. Dodatkowo możliwa jest komunikacja przez USB, co jest najczęściej wykorzystywane do konfiguracji przetwornika za pomocą oprogramowania eCon. Modbus to protokół komunikacyjny stworzony przez firmę Modicon. Realizuje on warstwę 7. modelu ISO OSI (aplikacji) w architekturze klient/serwer. Przyłączenie N43/P43 do Arduino lub innego urządzenia wyposażonego w interfejs UART jest możliwe za pomocą konwertera UART–RS-485. Komunikacja wymaga użycia biblioteki tworzącej urządzenie typu master Modbus RTU. Schemat pomiarowy i komunikacyjny przedstawiono na rysunku 8.

Obecnie proponowana jest technika kompensacji spadku napięcia na wielu liniach zasilających MLDC (ang. *Multiple Line Drop Compensation*) [4–7]. W artykule [11] zaprezentowano metodę kompensacji spadku napięcia na wielu liniach zasilających. Porównaną ją z klasyczną regulacją przy obecności rozproszonej generacji i magazynów energii. Przeprowadzone badania symulacyjne dają pozytywne wyniki. Typowa implementacja tego algorytmu polega na wykorzystaniu pomiarów



Rys. 8. Schemat pomiarowy z miernikiem parametrów sieci elektroenergetycznej
Fig. 8. Measuring scheme with a power network parameter meter

prądów z linii zasilających sieci SN i nn. Ponadto algorytm wykorzystuje rozpyły mocy czynnych i biernych w celu wyznaczenia optymalnej wartości zadanej napięcia oraz optymalnej pozycji zacze- pu. Jednak w praktyce utrzymanie aktualnego modelu sieci jest dość kłopotliwe [3]. Innym problemem jest fakt, że do wyznaczenia optymalnych nastaw wykorzystywane jest pewną liczbę obliczeń rozpyłowych (iteracje z różnymi wartościami parametrów). Takie obliczenia trwają pewien czas, a stan sieci zmienia się w sposób ciągły. Metodę kompensacji spadku napięcia na wielu liniach zasilających należy zmodyfikować, aby uwzględnić chociażby wartości skuteczne prądów każdej linii zasilanej ze stacji WN/SN.

6. Model bloku pomiarowego z klasyczną kompensacją prądową

Budowa modeli symulacyjnych pozwoli na przeprowadzenie badań porównawczych dla określonych danych wejściowych w trzech wariantach:

- bez kompensacji prądowej,
- z klasyczną kompensacją prądową,
- z proponowaną kompensacją prądową.

7. Założenia dla układu pomiarowego z proponowaną metodą kompensacji prądowej

Wymagane funkcje układu pomiarowego regulatora przełącz- ników zacze- pów:

1. Uwzględnienie pomiaru napięć we wszystkich fazach, ponie- waż może wystąpić asymetria napięć nawet w sieciach 15 kV.
2. Wyznaczenie składowej czynnej i biernej prądu w celu reali- zacji kompensacji prądowej. Wymagany jest pomiar wartości skutecznej oraz wyznaczenie współczynnika mocy. Parame-

try te są dostępne w miernikach/przetwornikach parametrów trójfazowej sieci elektroenergetycznej.

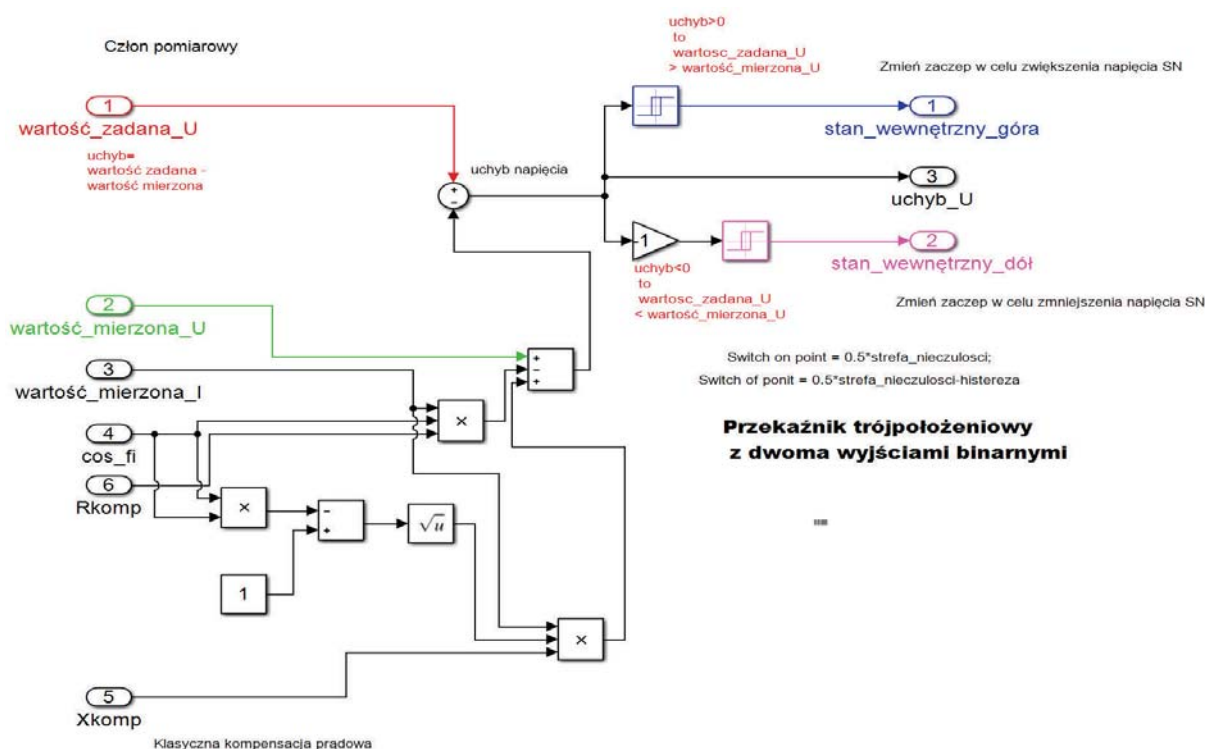
3. Przesyłanie wyników pomiarów i obliczeń za pomocą interfejsu komunikacyjnego do Arduino, np. RS-485 i protokołu Modbus. Powoduje to, że jakość wejść analogowych Arduino nie wpływa na jakość pomiarów wielkości analogowych ponieważ sygnał ten dostarczany jest cyfrowo. Ponadto liczba przesyłanych parametrów analogowych nie ogranicza się do liczby wejść analogowych mikrokontrolera. Ponadto przetwornik parametrów sieci elektroenergetycznej jest urządzeniami specjalnymi.

Jakie wymagane wielkości pomiarowe?

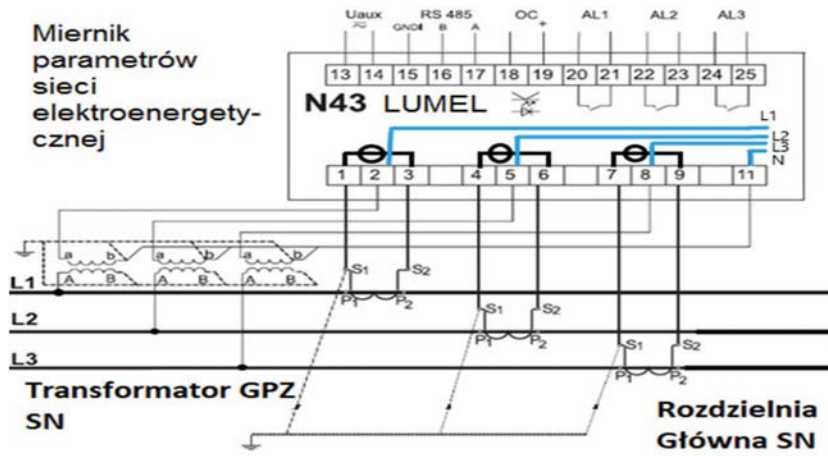
- Napięcia skuteczne fazowe U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} – wielkość podstawowa regulatora napięcie,
- Prądy skuteczne przewodowe I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} – do realizacji blokady przeciążeniowej oraz kompensacji prądowej,
- Dane umożliwiający wyznaczenie składowej czynnej i biernej prądu przewodowego (kompensacja prądowa):
 - moce czynne fazowe P1, P2, P3, wyznaczenie mocy pozor- nych S1, S2, S3 albo
 - współczynniki $\cos\varphi$ – osobno dla każdej fazy albo
 - współczynniki $\operatorname{tg}\varphi$ – osobno dla każdej fazy.

Jaka wymagana jest organizacja pomiarów i obliczeń?

Układy pomiarowe z miernikami parametrów sieci elektroener- getycznej są układami pomiaru mocy w sieci trójfazowej. Sieci SN są sieciami trójprzewodowymi. Z tego powodu nie mamy dostępnego przewodu zerowego. Mogłoby to wskazywać na konieczność pomiaru w obwodzie trójfazowym trójprzewodo- wym. Jednak są to układy pomiarowe z trzema watomierzami. Ich końce obwodów napięciowych połączone razem stanowią „sztuczne zero”. Ponadto trzy przekładniki napięciowe połą- czone w gwiazdę również tworzą punkt neutralny. Przetwor- niki/mierniki parametrów sieci w układach 4-przewodowych mają bezpośredni pomiar napięć fazowych, mocy czynnych



Rys. 9. Model symulacyjny członu pomiarowego z klasyczną kompensacją prądową
Fig. 9. Simulation model of the measuring element with classical current compensation



Rys. 10. Pomiar pośredni za pomocą trzech przekładników napięciowych oraz trzech przekładników prądowych i miernika parametrów sieci elektroenergetycznej N43 [12]

Fig. 10. Indirect measurement using three voltage transformers and three current transformers and a meter of the power network parameters N43 [12]

i biernych danej fazy oraz współczynników mocy. Na rysunku 10 przedstawiono schemat układu połączeń miernika parametrów sieci elektroenergetycznej N43 przy pomiarze pośrednim. Zastosowano w nim trzy przekładniki napięciowe i trzy prądowe. Dzięki połączeniu uzwojeń górnego napięcia oraz dolnego w gwiazdę uzyskano punkt neutralny. Co powoduje, że mamy dostępne wielkości fazowe. Sygnały pomiarowe są dostępne na zaciskach 16 i 17 po skonfigurowaniu adresu i parametrów komunikacji.

Z rysunku 10 wynika, że niezależnie od dostępności przewodu neutralnego w układzie z trzema przekładnikami napięciowymi i z trzema przekładnikami prądowymi można skonfigurować miernik do pracy w obwodzie 4-przewodowym. Wówczas obwody napięciowe realizowane są za pomocą zacisków nr 2, 5 i 8. Obwody prądowe z przekładników prądowych realizowane są za pomocą zacisków 1,3 i 4,6 oraz 7,9. Mierniki pracujące w układzie 4-przewodowym udostępniają napięcia, moce fazowe oraz współczynniki mocy dla każdej z faz. Zatem ten układ połączeń jest wymaganą konfiguracją.

Kompensacja prądowa może być wyznaczona osobno dla każdej fazy. Należy uwzględnić zarówno wartości skuteczne prądów przewodowych, napięć fazowych oraz współczynników mocy.

$$\begin{cases}
 I_{L1_re} = I_{L1} \cdot \cos \varphi_{L1} \\
 I_{L2_re} = I_{L2} \cdot \cos \varphi_{L2} \\
 I_{L3_re} = I_{L3} \cdot \cos \varphi_{L3} \\
 \sin \varphi_{L1} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{L1}} \\
 \sin \varphi_{L2} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{L2}} \\
 \sin \varphi_{L3} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{L3}} \\
 I_{L1_im} = I_{L1} \cdot \sin \varphi_{L1} \\
 I_{L2_im} = I_{L2} \cdot \sin \varphi_{L2} \\
 I_{L3_im} = I_{L3} \cdot \sin \varphi_{L3} \\
 U_{kL1} = \left| U_{L1} - \left[(R_{komp} \cdot I_{L1_re} - X_{komp} \cdot I_{L1_im}) + j(R_{komp} \cdot I_{L1_im} + X_{komp} \cdot I_{L1_re}) \right] \right| \\
 U_{kL2} = \left| U_{L2} - \left[(R_{komp} \cdot I_{L2_re} - X_{komp} \cdot I_{L2_im}) + j(R_{komp} \cdot I_{L2_im} + X_{komp} \cdot I_{L2_re}) \right] \right| \\
 U_{kL3} = \left| U_{L3} - \left[(R_{komp} \cdot I_{L3_re} - X_{komp} \cdot I_{L3_im}) + j(R_{komp} \cdot I_{L3_im} + X_{komp} \cdot I_{L3_re}) \right] \right|
 \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: R_{komp} – rezystancja kompensacji, X_{komp} – reaktancja kompensacji, U_{L1} – zespolone napięcie fazowe L1, U_{L2} – zespolone

napięcie fazowe L2, U_{L3} – zespolone napięcie fazowe L3, I_{L1_re} – część rzeczywista prądu przewodowego L1, I_{L1_im} – część urojona prądu przewodowego L1, I_{L2_re} – część rzeczywista prądu przewodowego L2, I_{L2_im} – część urojona prądu przewodowego L2, I_{L3_re} – część rzeczywista prądu przewodowego L3, I_{L3_im} – część urojona prądu przewodowego L3, U_{kL1} – napięcie skuteczne pomiarowe fazowe L1 po kompensacji prądowej, U_{kL2} – napięcie skuteczne pomiarowe fazowe L2 po kompensacji prądowej, U_{kL3} – napięcie skuteczne pomiarowe fazowe L3 po kompensacji prądowej.

Regulator wyznacza uchyb napięcia używając jedną wartość napięcia pomiarowego oraz jedną wartość napięcia zadanego. Wartość napięcia pomiarowego dla regulatora może być wyznaczona z układu równań (7) i (8). W zależnościach tych wykorzystuje się wartość średnią napięć fazowych. Jeśli wszystkie napięcia są $\geq 1,05 \cdot U_f$ ($U_f = U_n / \sqrt{3}$) istnieje niebezpieczeństwo przekroczenia górnej granicy dopuszczalnego napięcia. Wówczas napięciem pomiarowym jest maksymalna wartość z napięć fazowych. Jeżeli wszystkie napięcia fazowe są mniejsze od $0,95 \cdot U_f$ istnieje niebezpieczeństwo przekroczenia dolnej granicy dopuszczalnego napięcia. Wówczas napięciem pomiarowym jest minimalna wartość z napięć fazowych.

$$\begin{cases}
 U_{\min} = \min(U_{kL1}, U_{kL2}, U_{kL3}) \\
 U_{\max} = \max(U_{kL1}, U_{kL2}, U_{kL3}) \\
 U_{\text{avg}} = 1/3 \sqrt{U_{kL1}^2 + U_{kL2}^2 + U_{kL3}^2}
 \end{cases} \quad (7)$$

$$U_T = \begin{cases}
 U_{\min} \text{ gdy } U_{kL1} \leq 0,95 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}, U_{kL2} \leq 0,95 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}, U_{kL3} \leq 0,95 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \\
 U_{\max} \text{ gdy } U_{kL1} \geq 1,05 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}, U_{kL2} \geq 1,05 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}, U_{kL3} \geq 1,05 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \\
 U_{\text{avg}} \text{ w pozostałych przypadkach}
 \end{cases} \quad (8)$$

gdzie: U_n – napięcie znamionowe sieci jest napięciem międzyfazowym [14], U_T – napięcie pomiarowe strony niższego napięcia, U_{\min} – napięcie minimalne z wartości fazowych, U_{\max} – napięcie maksymalne z wartości fazowych, U_{avg} – napięcie średnie z wartości fazowych.

8. Wytyczne do proponowanej metody kompensacji prądowej

Podstawy sterowania rozmytego opisano w monografii [15]. Jedną z możliwych implementacji jest zastosowanie sterownika rozmytego lub neuronowo-rozmytego do następujących celów:

- utworzenie bazy wiedzy na podstawie danych testowych, wyników rozplywów przy losowych zmianach konfiguracji sieci, struktury źródeł i obciążeń;
- parametrów kompensacji prądowej,
- wartości zadanej napięcia,
- uwzględnienie obciążeń poszczególnych linii zasilanych z GPZ,
- wyznaczenie parametrów: szerokości martwej strefy oraz szerokości histerezy,
- na podstawie wielu symulacji off-line wyznaczenie minimalnej liczby punktów pomiarowych zapewniających prawidłową pracę układu.

9. Wnioski

1. Utworzono modele symulacyjne wewnętrznej części pomiarowej regulatora przełącznika zacze-
pów dla stacji WN/SN. Modele te zrealizowano w dwóch wersjach bez kompensacji prądowej oraz z klasyczną kompensacją prądową. Modele te zostały pozytywnie przetestowane symulacyjnie.
2. Utworzony model symulacyjny pomimo założeń upraszczających (praca z jednym transformatorem, nie modelowano walidacji wprowadzanych nastaw, nie modelowano zjawisk komunikacji regulatora z urządzeniami nadrzędnymi) jest wieloosiowym, złożonym obiektem. Wymaga to budowy skomplikowanego modelu symulacyjnego.
3. Testowano poszczególne podsystemy (bloki) generując zestawy danych wejściowych oraz analizując sygnały wynikowe (nie przedstawiono w publikacji). Utworzony cały model sprawdzono na podstawie uzyskanych na podstawie badań symulacyjnych charakterystyk czasowych. Wyniki symulacji potwierdzają poprawność działania modelu regulatora.
4. Implementacja wewnętrznej części pomiarowej była możliwa nawet na tak prostym 8-bitowym mikrokontrolerze jakim jest Arduino uno. Układ ten ma znaczne możliwości komunikacyjne – UART, SPI, TWI. Jednak gdy wymagana jest większa moc obliczeniowa, koprocessor zmiennie-przecinkowy, wektorowy system przerwań lub niezależność komunikacji i przerwań użytkownika wymagana jest jednostka 32-bitowa.
5. Prawidłowa realizacja kompensacji prądowej poprawia jakość regulacji napięcia oraz pomaga utrzymać stabilność napięciową. Niewłaściwa kompensacja prądowa prowadzi do pogorszenia jakości regulacji napięcia. Układy kompensacji prądowej powinny uwzględniać trzy napięcia fazowe, trzy prądy przewodowe i współczynniki mocy dla każdej z faz. Uwzględnić to możliwą asymetrię układów trójfazowych.
6. Wymagane wielkości pomiarowe do realizacji proponowanej kompensacji prądowej są dostępne w standardowo dostępnych przetwornikach parametrów trójfazowej sieci elektroenergetycznej. Układ pracy z trzema przekładnikami napięciowymi oraz trzema przekładnikami prądowymi umożliwia pomiar sygnałów dla każdej z faz jak w układzie cztero-przewodowym. Budowę regulatora ułatwia wykorzystanie standardowego przetwornika lub analizatora parametrów sieci elektroenergetycznej.
7. Implementacja kompensacji prądowej w regulatorze wymaga pomiaru parametrów sieci elektroenergetycznej trójfazowej. Przy założeniu, że w sieci 15 kV mamy nieznaczne odkształcenia, współczynnik mocy zależy głównie od przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem.

Wówczas można wykorzystać zależności (6). Pozwala to na prawidłową pracę regulatora nawet przy znacznej asymetrii napięć.

8. Przedstawiono koncepcję nowej metody kompensacji prądowej. W celu jej weryfikacji należy zbudować modele pozostałych elementów układu regulacji napięcia w sieci SN.
9. Należy zbadać symulacyjnie oraz doświadczalnie możliwości implementacji skutecznej kompensacji prądowej z wykorzystaniem przetwornika lub miernika parametrów sieci elektroenergetycznej. Jest to specjalistyczne elektroniczne urządzenie pomiarowe dla sygnałów przemiennych. Należy przeanalizować parametry techniczno-metrologiczne.
10. Zbadanie możliwości implementacji wybranego miernika parametrów sieci elektroenergetycznej do realizacji nowego typu kompensacji prądowej będzie przedmiotem kolejnych prac badawczych.
11. MLDC to algorytm kompensacji prądowej uwzględniający obciążenia poszczególnych linii. Należy też uwzględnić rodzaj i przekroje poszczególnych linii zasilanych ze stacji WN/SN.
12. Typowa implementacja algorytmu MLDC do swojej pracy wymaga modelu sieci oraz wielokrotnych obliczeń rozplywowych. Utrzymanie aktualnego modelu sieci jest trudne. Ponadto obliczenia optymalizacyjne wymagają wielokrotnych obliczeń rozplywowych. Jest to proces czasochłonny. Stan sieci zmienia się w sposób dynamiczny. Wyniki obliczeń zrealizowane na podstawie danych wejściowych sprzed kilku minut mogą być nieaktualne.
13. Występuje problem wyznaczenia parametrów impedancji kompensacji. Parametry te zmieniają się w czasie. Zależne są od aktualnej konfiguracji sieci, obciążeń oraz aktualnego składu odbiorów i generacji. Z tego powodu wyznaczono wytyczne do zastosowania sterowników rozmytych do nowego typu regulatora przełącznika zacze-
pów. Wymaga to dalszej analizy i prac badawczych.
14. Utworzenie modelu sieci elektroenergetycznej oraz przygotowanie danych wejściowych umożliwi utworzenie rozmytej bazy wiedzy dla sterownika regulatora.

Bibliografia

1. Machowski J., *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
2. Hellman W., Szczerba Z., *Regulacja częstotliwości i napięcia w systemie elektroenergetycznym*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1978.
3. Czaplą Ł., Ogryczak T., *System zarządzania napięciem i mocą bierną obszaru sieci inteligentnej (SMART GRID)*, „Elektro.Info”, Nr 7–8, 2012.
4. Joon-Ho C., Jae-Chul K., *Advanced Voltage Regulation Method at the Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, 691–696, 2000, DOI: 10.1109/PESS.2000.868793.
5. Choi J.-H., *Advanced Voltage Regulation Method of Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems (Revised)*, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Vol. 16, No. 2, 329–334, 2001, DOI: 10.1109/61.915503.
6. Joon-Ho Choi and Seung-II Moon, *The Dead Band Control of LTC Transformer at Distribution Substation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 1, 319–326, 2009.
7. Huang S., Pillai J. R., Liserre M., Bak-Jensen B., *Improving photovoltaic and electric vehicle penetration in distribution grids with smart transformer*, IEEE PES ISGT Europe 2013, 1–5.

8. Korpikiewicz J., *Budowa modelu symulacyjnego regulatora przełączników zaczeów transformatora WN/SN – założenia i wymagania*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 22, Nr 2/2018, 67–76, DOI: 10.14313/PAR_228/67.
9. Sobczak B., Rink R., *Kompensacja prądowa w regulatorach napięcia generatorów systemowych – referat konferencyjny*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej”, Nr 32/2013, 127–130.
10. Szczeciński P., Zajczyk R., *Wpływ układu kompensacji prądowej na pracę generatora przy zmianach napięcia w KSE*, „Acta Energetica”, Vol. 2, Nr 4, 77–82, 2010.
11. Mesut E. Baran, Ming-Young Hsu, ‘Volt/Var control at distribution substation’, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 1, 312–318, 1999.
12. S. A. Lumel, Miernik parametrów sieci na szynę typu N43. Instrukcja obsługi. Lumel S.A., 2018.
13. S. A. Lumel, N43 miernik parametrów sieci na szynę. Karta katalogowa. Lumel S.A., 2018.
14. Polski Komitet Normalizacyjny, ‘PN-EN 61936-1:2011. Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV – Część 1: Postanowienia ogólne.’ Polski Komitet Normalizacyjny, 2011.
15. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1996.

Construction of a Simulation Model of the HV/MV Transformer Tap Changer Controller – Current Compensation

Abstract: The article presents the structure of the HV/MV transformer tap changer controller. All blocks of the regulator are described. The measuring system with the current compensation circuit is described in detail. A model was created in Simulink of the analyzed part of the regulator. Simplifications introduced – no block detection of the voltage correctness measurement. A simulation scheme was created to test the developed Simulink model. The results of tests confirming the correctness of the work of the created model are presented. The concept of a new method of current compensation considering the measurements of a three-phase power grid has been proposed.

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

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 Uniwersytetu Morskiego 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).

