

## ZASTOSOWANIE NOWEGO ALGORYTMU KOMPENSACJI PRĄDOWEJ W REGULATORZE PRZEŁĄCZNIKA ZACZEPÓW TRANSFORMATORA WN/SN

Jarosław KORPIKIEWICZ

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk Instytut Badawczy  
tel.: (58) 349-82-11 e-mail: j.korpikevicz@ien.gda.pl

**Streszczenie:** Artykuł dotyczy regulacji napięcia w sieci SN za pomocą statycznych przełączników zaczepów. W artykule rozważano problematykę kompensacji prądowej w regulatorze przełączników zaczepów transformatora WN/SN. Kompensacja prądowa obecnie jest często wyłączana. Jest to spowodowane tym, że kompensacja dotyczy wirtualnej pojedynczej linii SN. W artykule przedstawiono wyniki symulacji na modelu fizycznym dla prostej sieci SN zasilanej ze stacji WN/SN przy występowaniu asymetrii napięć i obciążeń dla trzech przypadków: wyłączona kompensacja prądowa, klasyczna kompensacja oraz proponowana jej nowa formuła. Proponowany algorytm zaimplementowano na mikrokontrolerze STM32. W celu uwzględnienia asymetrii wykorzystano pomiary w trzech fazach, co wymaga modyfikację układu pomiarowego.

**Słowa kluczowe:** kompensacja prądowa, asymetria napięć, asymetria obciążenia, STM32, elektroniczne przełączniki zaczepów transformatora.

### 1. WSTĘP

Algorytm sterowania klasycznymi przełącznikami zaczepów transformatorów został przedstawiony m.in. [1]. Zastosowania elektronicznych przełączników zaczepów transformatorów dystrybucyjnych zaprezentowano w [2]. Różnice algorytmu sterowania klasycznymi i półprzewodnikowymi przełącznikami zaczepów opisano w [3]. Celem artykułu jest weryfikacja czy uwzględnienie asymetrii w kompensacji prądowej poprawi jakość regulacji napięcia. Zagadnieniami kompensacji prądowej zajmowano się m.in. w [4-6]. Kompensację spadku napięcia na wielu liniach zasilających przedstawiono m.in. w [7-9]. Jednak nie ma komercyjnego zadowalającego rozwiązania, które mogłoby być zaimplementowane w regulatorach przełączników zaczepów. Proponowana w publikacjach kompensacja spadku napięcia na wielu liniach zasilających wymaga opracowania i ciągłej aktualizacji modelu sieci, realizacji wielu obliczeń rozplywowych. Sieć SN jest w niewielkim zakresie opomiarowana. Problem utworzenia modeli i ich aktualizacji jest pracochłonne, a niekiedy nawet niemożliwe. Z tych powodów należy poszukać innego typu rozwiązania. Przy czym powszechnie stosowana prawidłowa kompensacja prądowa poprawia „sztywność sieci” oraz poprawia stabilność napięciową.

### 1.1. Problemy realizacji kompensacji prądowej w regulatorach przełączników zaczepów

Kompensacja prądowa stosowana jest zarówno w regulatorach napięcia generatorów synchronicznych jak i przełączników zaczepów transformatora WN/SN. Ze względu na złożoność sieci SN, ciągłe zmiany w sieciach elektroenergetycznych trudno jest wyznaczyć parametry kompensacji prądowej [10]. Dodatkowym czynnikiem komplikującym realizację kompensacji prądowej są asymetrie napięć zasilających oraz asymetrie obciążeń. Obecnie komercyjnie dostępne regulatory wykorzystują pomiar napięcia oraz prądu tylko jednej fazy. W przypadku wystąpienia asymetrii napięć działanie regulatora może być niewłaściwe. W artykule tym zostanie uwzględniona asymetria napięć i obciążeń w algorytmie kompensacji prądowej. Algorytm ten został zaimplementowany na 32-bitowym mikrokontrolerze firmy STMicroelectronics.

Uwzględniając dostępność pomiarów parametrów sieci trójfazowej dla każdej z faz wraz z współczynnikiem mocy, składowe czynna i bierną prądu i napięcia kompensacji można opisać układem równań:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{LKre} = I_{LK} \cdot \cos \varphi_{LK} \\ \sin \varphi_{LK} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{LK}} \\ I_{LKim} = I_{LK} \cdot \sin \varphi_{LK} \\ U_{kLK} = \left| U_{LK} \cdot e^{j0} - \left[ \begin{array}{l} (R_{komp} \cdot I_{LKre} - X_{komp} \cdot I_{LKim}) \\ + j(R_{komp} \cdot I_{LKim} + X_{komp} \cdot I_{LKre}) \end{array} \right] \right| \end{array} \right. \quad (1)$$

gdzie: K – numer fazy,  $I_{LK}$  – wartość skuteczna prądu fazy K,  $I_{LKre}$  – część rzeczywista prądu fazy K,  $I_{LKim}$  – część urojona prądu fazy K,  $\cos \varphi_{LK}$  – zmierzony współczynnik mocy fazy K,  $U_{LK}$  – wartość skuteczna napięcia fazowego K,  $U_{kLK}$  – wartość skuteczna napięcia fazowego K po kompensacji,  $R_{komp}$ ,  $X_{komp}$  – parametry kompensacji prądowej. Parametry kompensacji przyjmowane są arbitralnie.

W celu uwzględnienia asymetrii napięć i obciążeń wymagane są pomiary napięć fazowych, prądów

przewodowych oraz współczynników mocy. Takie dane dostarczają przetworniki parametrów sieci elektroenergetycznej.

Regulator w celu wyznaczenia uchybu napięcia używa jednej wartości napięcia pomiarowego oraz jednej wartości napięcia zadanego. Wartość napięcia pomiarowego dla regulatora może być wyznaczona następująco – układy równań (2) i (3).

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

gdzie:  $U_{\min}$  – minimalne napięcie kompensacji,  $U_{\max}$  – maksymalne napięcie kompensacji,  $U_{\text{avg}}$  – średnie napięcie kompensacji.

$$U_T = \begin{cases} U_{\min} \text{ gdy: } \bigcap_{K=1,2,3} U_{kLK} \leq 0,95 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \\ U_{\max} \text{ gdy: } \bigcap_{K=1,2,3} U_{kLK} \geq 1,05 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \\ U_{\text{avg}} \text{ w pozostałych wypadkach} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:  $U_T$  – wynikowa wartość napięcia pomiarowego po kompensacji,  $U_n$  – wartość skuteczna napięcia znamionowego.

Jeśli wszystkie napięcia są większe bądź równe  $1,05U_f$  istnieje niebezpieczeństwo przekroczenia górnej granicy dopuszczalnego napięcia. Wówczas napięciem pomiarowym jest maksymalna wartość z napięć fazowych. Analogicznie jest dla wartości minimalnej.

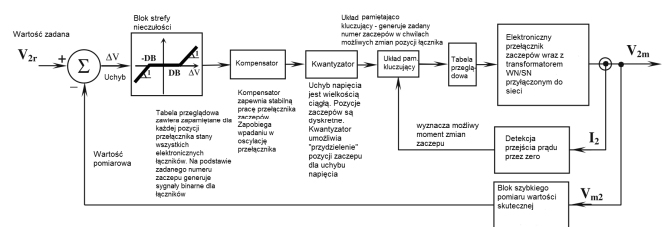
## 1.2. Algorytm sterowania elektronicznym przełącznikiem zaczeów transformatora WN/SN[3]

Algorytm sterowania statycznymi przełącznikami zaprezentowano w [3]. Istotnymi różnicami w algorytmie w stosunku do przełączników elektromechanicznych są:

- Wysoka częstotliwość przełączania zaczeów np. co okres. Tranzystory IGBT mają czasy załączania i wyłączenia rzędu ns.
- Brak ograniczeń co do liczby przełączeń.
- Zmiana zaczeu nie musi odbywać się sekwencyjnie.
- Nie występuje łuk elektryczny.
- Wymagany szybki układ pomiaru parametrów sieci elektroenergetycznej ze względu na szybkie sterowanie tj. w czasie jednego okresu. W regulatorach elektromechanicznych przełączników zaczeów wartość skuteczna napięcia była uśredniana za dłuższy okres.

Różnice te implikują zmiany algorytmu sterowania dla w pełni elektronicznych przełączników zaczeów. Na rysunku 1 zaprezentowano schemat pracy regulatora elektronicznych przełączników zaczeów transformatora. Jest on inny niż dla klasycznych przełączników.

Blok szybkiego pomiaru wartości skutecznej (rysunku 1) realizuje obliczenia wg (4).



Rys. 1 Schemat pracy regulatora statycznych przełączników zaczeów[3]

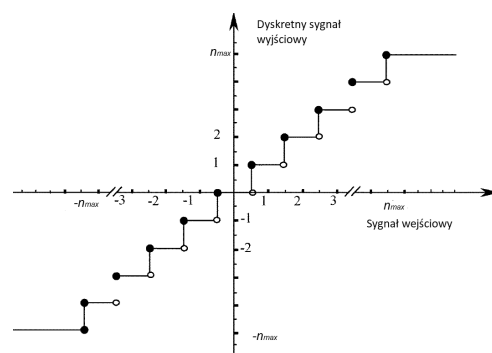
$$U_{2m(rms)}(t_k) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} U_{2m}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{t_k} U_{2m}^2(t) dt} - \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{t_k-T} U_{2m}^2(t) dt} \quad (4)$$

gdzie:  $U_{2m}^2(t)$  – kwadrat wartości chwilowej napięcia mierzonego w chwili  $t$ ,  $U_{2m(rms)}(t_k)$  – wartość skuteczna napięcia pomiarowego w chwili  $t_k$ ,  $T$  - okres.

Blok martwej strefy jest wymagany z powodu, że zmiana numeru zaczeu jest operacją nieciągłą. W regulatorze elektromechanicznych zaczeów była możliwość przełączenia na zaczeu o 1 wyższy lub o 1 niższy, gdy nie osiągnięto położenia skrajnego. W regulatorach elektronicznych przełączników zaczeów można zmienić zaczeu na dowolny. Zatem sygnałem wyjściowym tego bloku jest sygnał analogowy.

Blok kompensacji służy do redukcji szybkich zmian uchybu napięcia w celu zachowania stabilności pracy układu regulacji przy zachowaniu jakości regulacji. Zawiera on integrator z dobranymi parametrami. Likwiduje to zbędne ciągłe zmiany zaczeów spowodowane np. chwilowymi przemijającymi wahaniami napięcia. Przełączenia te generowałyby kolejne stany przejściowe, co skutkowało by ciągłymi nieustającymi oscylacjami napięcia.

Kwantyzator musi zostać dodany ze względu na to, że liczba zaczeów jest liczbą naturalną. Zakres wyjściowy kwantyzatora to przedział liczb całkowitych  $\langle -n_{\max} \div +n_{\max} \rangle$  - patrz rysunek 2. Należy dla danego przedziału wartości uchybu napięcia przydzielić numer zaczeu.



Rys. 2 Charakterystyka statyczna bloku kwantyzacji[3]

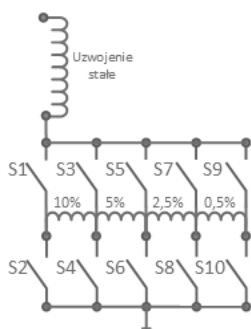
Blok detekcji przejścia przez zero służy do zapewnienia zmiany zaczeu przy prądzie bliskim zero. Blok próbkowania z pamięcią (interpolator rzędu zerowego) znajduje się m.in. w przetwornikach analogowo-cyfrowych. Istnienie tego bloku wynika z faktu, że przetworniki A/C dokonują pomiaru w określonych odstępach czasu. W elektronicznym przełączniku zaczeów każda pozycja zaczeu odpowiada określonym stanom łączników. Są przechowywane w tabeli przeglądowej wraz z wybraną pozycją zaczeu. Postać tej tabeli zależna jest od schematu

połączeń uzwojenia regulacyjnego wraz z dwukierunkowymi łącznikami półprzewodnikowymi.

Na dobór układu połączeń uzwojenia regulacyjnego mają wpływ następujące czynniki:

- Redukcja kosztów całkowitych. Zależą one do liczby zaczipów uzwojenia oraz liczby łączników półprzewodnikowych. Ceny tranzystorów IGBT już nie są tak wysokie. Cena tranzystora IGBT; 1200V; 120A; 595W jest niższa niż 80 zł.
- Wymaganie niezawodności pracy. Parametry łączników półprzewodnikowych należy przewymiarować ponieważ powinny być one odporne na maksymalny prąd zwarcioowy w czasie takim jakim wyłączy zabezpieczenie. Łączniki muszą być także odporne na przepięcia.
- Redukcja strat mocy (głównie elementy półprzewodnikowe).
- Duża liczba zaczipów zapewnia dokładniejszą regulację napięcia (mniejszy krok napięcia).
- Elastyczność połączeń i konfiguracji np. możliwość zmiany kierunku uzwojenia regulacyjnego.

Przedstawiona konfiguracja uzwojenia cechuje się dużą liczbą łączników ale też wysoką elastycznością. Dla pięciu fizycznych zaczipów umożliwia realizację 21 stopni regulacji. Elastyczność tą uzyskano przy zastosowaniu różnicowanych napięć poszczególnych zaczipów.



Rys. 3 Schemat połączeń uzwojenia regulacyjnego

### 1.3. Schemat sieci elektroenergetycznej

W celu przeprowadzenia badań należy zdefiniować sieć SN zasilaną z transformatora regulacyjnego. Ze względu na cel badania – wpływu asymetrii napięć i obciążeń na jakość regulacji napięcia wybrano najprostszy przypadek – jednej linii SN. W tym przypadku łatwo wyznaczyć parametry kompensacji. W badaniach tych nie rozważano problemu różnorodności obciążeń oraz budowy linii SN.

Jako wskaźnik jakości regulacji napięcia wybrano sumę wartości bezwzględnej uchybów napięcia na końcu linii SN – (5). Napięcie to nie jest dostępne dla regulatora.

$$J = \sum_{t=0}^N \left( \left| U_{L1\_P}(t) - \frac{U_n}{\sqrt{3}} \right| + \left| U_{L2\_P} - \frac{U_n}{\sqrt{3}} \right| + \left| U_{L3\_P} - \frac{U_n}{\sqrt{3}} \right| \right) \quad (5)$$

gdzie:  $U_{LK\_P}$  – wartość skuteczna napięcia mierzonego na końcu linii SN chwili  $t$  dla fazy  $K$  (przy ostatnim odbiorze – w punkcie P).  $U_n$  – znamionowa wartość skuteczna napięcia sieci,  $N$  – liczba pomiarów.

## 2. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA BADAŃ

### 2.1. Implementacja algorytmu sterowania

Algorytm sterowania elektronicznym przełącznikiem zaczipów (bez kompensacji, z klasyczną kompensacją oraz badaną wersją kompensacji) implementowany jest na płycie prototypowej STM32F769I-DISC0 firmy ST zawierającej m.in. 32-bitowy mikrokontroler cortex M7: STM32F769NIH6 o częstotliwości 216 MHz, programator ST-Link/V2-1, 512+16+4 KB pamięć RAM, 2 MB flash, port Ethernet, USB oraz obwody zasilające. Programowanie zrealizowano w Simulink Coder Support Package for STMicroelectronics i przewodu USB. Sygnały wejściowe oraz wyjściowe regulatora są zapewnione poprzez komunikację szeregową TCP z komputerem z uruchomionym modelem Simulink Desktop Real-Time.

### 2.2. Implementacja sieci WN i SN oraz transformatora

Ze względu na to, że dostęp do rzeczywistego transformatora 110/15 kV pracującego w sieci jest ograniczony w celu przeprowadzenia badań został zbudowany symulacyjny model sieci przy wykorzystaniu Matlab/Simulink z pakietem Simscape Power Systems. Pakiet ten ułatwia tworzenie modeli zawierających linie elektroenergetyczne, transformatory, urządzenie energoelektroniczne. Na rysunku 4 przedstawiono model zaczipu trójfazowego wraz z łącznikami wykorzystującym model transformatora wielouzwojeniowego. Wejścia Contr1-Contr10 – binarne sygnały sterujące łącznikami. Tap1-Tap5-zaciski zaczipów. Realizuje on schemat połączeń wg rysunku 3.

### 2.3. Implementacja komunikacji regulatora z otoczeniem

Komunikacja regulatora z komputerem odbywa się za pomocą UART. Do portu USB komputera podłączony jest port programatora mikrokontrolera albo zewnętrzny konwerter USB-UART. Programowa obsługa komunikacji odbywa się za pomocą pakietu Matlab/Simulink oraz pakietu Simulink Desktop Real-Time oraz bloków Packed Input, Packed Output. Umożliwiają one komunikację binarną.

## 3. WYNIKI SYMULACJI

Tablica 1. Wyniki symulacji – wskaźnik jakości regulacji napięcia  $J$  przy asymetrii napięć i obciążen

Wariant	Brak kompensacji prądowej	Klasyczna kompensacja prądowa	Proponowana kompensacja prądowa
Pełna symetria	400	250	250
Asymetria napięć zasilających	600	554	384
Asymetria obciążeń	480	402	352
Asymetria napięć zasilających oraz obciążeń	800	722	390

## 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Kompensacja prądowa stanowi jedynym z ważniejszych zagadnień przy regulacji napięcia. Uwzględnienie asymetrii napięcia zasilającego oraz

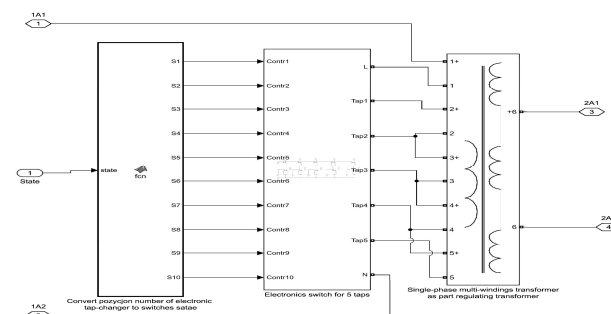
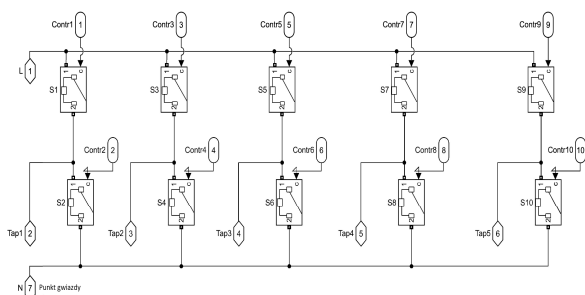
obciążenia poprawia jakość regulacji napięcia regulacji przy wystąpieniu tego typu zakłóceń. Potwierdzono również możliwość implementacji nowego typu kompensacji prądowej w regulatorze elektronicznych przełączników zaczepów. Jednak to nie rozwiązuje problemu zróżnicowania obciążeń linii zasilanych ze stacji GPZ. Obecnie rozważa się różne wersje algorytmu spadku na wielu liniach zasilających. Jednak ten problem nie został rozwiązany i wymaga to dalszych badań i poszukiwania nowych rozwiązań.

W publikacjach [2,3] proponuje się zastosowanie modulacji DCM (ang. discrete-cycle modulation) tj. częstego przełączania zaczepów w ciągu okresu w celu uzyskania pośrednich wartości skutecznych niż wynikałoby to z wybranych pozycji zaczepów. Regulacja za pomocą przełączników zaczepów transformatora z natury jest nieciągła. Jej dokładność należy dobrać poprzez zaprojektowanie uzwojenia regulacyjnego. Skutkiem takich przełączeń (DCM) jest wprowadzenie do sieci wielu harmonicznych i interharmonicznych. Zdaniem autora urządzenia takie mogą nie spełniać wymagań o kompatybilności elektromagnetycznej ze względu na zniekształcenie sygnału sinusoidalnego a korzyści z tej techniki są znikome.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- 1 J. Korpikiewicz, „Construction of a simulation model of the HV/MV transformer tap-changer controller – assumptions and requirements”, *Pomiary Automatyka Robotyka*, t. R. 22, nr 2/2018, s. 67–76, 2018.
- 2 J. Faiz i B. Siahkolah, *Electronic tap-changer for distribution transformers*. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

- 3 J. Faiz i B. Siahkolah, „Differences Between Conventional and Electronic Tap-Changers and Modifications of Controller”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, t. 21, nr 3, s. 1342–1349, lip. 2006.
- 4 P. Szczeciński i R. Zajczyk, „Wpływ układu kompensacji prądowej na pracę generatora przy zmianach napięcia w KSE”, *Acta Energetica*, t. 2, nr 4, s. 77–82, kwi. 2010.
- 5 B. Sobczak i R. Rink, „Kompensacja prądowa w regulatorach napięcia generatorów systemowych - referat konferencyjny”, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, nr 32/2013, s. 127–130, 2013.
- 6 W. Hellman i Z. Szczerba, *Regulacja częstotliwości i napięcia w systemie elektroenergetycznym*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1978.
- 7 C. Joon-Ho i K. Jae-Chul, „Advanced Voltage Regulation Method at the Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, t. 15, nr 2, s. 691–696, kwi. 2000.
- 8 J.-H. Choi, „Advanced Voltage Regulation Method of Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems (Revised)”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, t. 16, nr 2, s. 6, 2001.
- 9 C. Joon-Ho i M. Seung-II, „The dead band control of LTC transformer at distribution substation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 24, nr 1, s. 319–326, 2009.
- 10 Ł. Czapla i T. Ogryczak, „System zarządzania napięciem i mocą bierną obszaru sieci inteligentnej (SMART GRID)”, *Elektro.Info*, nr 7–8, 2012.



Rys. 4 Schemat modelu przełącznika zaczepów wraz z elektronicznymi łącznikami zrealizowanego w Simulink - Simscape - Power System - Specialized Technology

## APPLICATION OF A NEW ALGORITHM FOR CURRENT COMPENSATION AT THE REGULATOR OF THE TAP-CHANGER FOR HV/MV TRANSFORMERS

The article concerns voltage regulation in MV network by means of static tap changers. The article considers the problem of current compensation in the HV / MV transformer tap changer controller. Current compensation is often turned off. This is due to the fact that the compensation applies to a virtual single SN line. The article presents simulation results on a physical model for a simple MV network fed from a WN / SN station with the occurrence of voltage and load asymmetry for three cases: switched off current compensation, classical compensation and the proposed new formula. The proposed algorithm has been implemented on the STM32 microcontroller. In order to take into account the asymmetry, measurements in three phases were used, which requires modification of the measurement system.

**Keywords:** current compensation, voltage asymmetry, load asymmetry, STM32, solid-state tap-changers for transformer.