1. Filip STASZAK[1], 2. Andrzej KSIĄŻKIEWICZ [2], Rafał M. WOJCIECHOWSKI[3]

1) Politechnika Poznańska, 2) ASTAT Sp. z o.o. ORCID: 0000-0003-0175-6566
3) Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
ORCID: 0000-0003-4906-469X

doi:10.15199/48.2023.12.44

System automatycznej regulacji napięcia (LVRSys) przewidziany do pracy w sieciach niskiego napięcia

Streszczenie. *W artykule omówiono problematykę związaną z utrzymaniem odpowiedniego poziomu napięć w sieciach niskiego napięcia (nn) Przedstawiono także powszechnie stosowane układy stosowane w systemach regulacji napięcia sieci nn, z szczególnym uwzględnieniem układu automatycznej regulacji LVRSys opracowanym przez firmę A. Eberle GmbH. W ramach realizowanych badań, w pracy przedstawiono analizę stanów pracy ww. systemu LVRSys dla rożnych charakterów odbiorników sieci. Omówiona została także budowa systemu automatycznej regulacji, a także omówiono opracowany model numeryczny rozpatrywanego systemu LVRSys opracowany w środowisku Matlab/Simulink.*

Abstract*. The paper deals with the issues related to maintaining the appropriate voltage level in Low Voltage Networks (LVN). Commonly used systems used in Low Voltage Network voltage regulation systems are also presented, with particular emphasis on the LVRSys automatic control system developed by A. Eberle GmbH. As part of the conducted research, the paper presents an analysis of the operating conditions of the above-mentioned of the LVRSys system for various types of network loads. The construction of the automatic control system was also discussed, as well as the developed numerical model of the considered LVRSys system developed in the Matlab/Simulink environment. (****Automatic voltage regulation system (LVRSys) designed to work in low voltage networks****)*

Słowa kluczowe: sieci elektroenergetyczne, sieci niskiego napięcia, systemy automatycznej regulacji napięcia (LVRSys)
Keywords: power networks, low voltage networks, automatic voltage regulation systems (LVRSys)

Wstęp

Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia w Polsce cechują się największą całkowitą długością w przeliczeniu na jeden tor spośród wszystkich rodzajów sieci [1], co w połączeniu z najniższym poziomem napięć przekłada się na najwyższy spadek poziomu napięcia wzdłuż linii. Jako, że odbiorcy na tym poziomie napięć stanowią dominującą większość odbiorców energii elektrycznej w Polsce, utrzymanie właściwego poziomu napięcia w sieciach niskiego napięcia (*nn*) stanowi dla dostawców energii bardzo istotne wyzwanie. Polska Norma PN-IEC:60038 stanowi, że napięcie znamionowe przewodu fazowego sieci *nn* powinno być na poziomie 230V, natomiast zalecenie tej normy, dotyczące typowych warunków użytkowania sieci *nn*, dopuszcza jedynie odchylenia napięcia sieci w zakresie ±10%, co przekłada się odpowiednio na zakres napięć w przedziale od 207V do 253V [2].

Obecnie w systemie dystrybucji energii, regulacja napięcia w sieciach *nn* jest realizowana w transformatorach *SN*/*nn* poprzez beznapięciowe przełączniki zaczepów [3]. Działanie tego typu przełączników polega na zmianie stosunku liczby zwojów czynnych jednej, rzadziej obu, stron transformatora, co skutkuje zmianą przekładni transformatora oraz wartości napięcia po stronie wtórnej. Wadą takiego rozwiązania jest brak możliwości reagowania na dynamiczne wahania obciążenia lub napięcia zasilającego transformator [4]. Zmiana zaczepów w transformatorze odbywa się przede wszystkim sezonowo, głównie na wiosnę lub jesień, w przygotowaniu na nadchodzący sezon letni lub zimowy. Wymaga to przyjazdu na daną podstację pracownika oraz wyłączenia transformatora na czas prac. Współcześnie poszukuje się jednak rozwiązań mających na celu zastąpienie tej metody regulacji inną, zdolną reagować dynamicznie na zmiany sytuacji w sieci, bez konieczności odłączania źródła napięcia i możliwie jak najbardziej ją zautomatyzować [5].

Regulacja napięcia na poziomie sieci *nn* to obecnie jeszcze mało zbadane rozwiązanie, głównie ze względu na analogiczne instalacje na poziomie sieci *SN*, za którymi przemawiają niskie koszty i duża prostota. Obecnie sieć elektroenergetyczna w Polsce, jak i w pozostałych krajach europejskich, przechodzi przez niespotykane dotąd zmiany, związane z popularyzacją tzw. „*zielonych technologii*”, wskutek których coraz częściej do sieci przyłączane są instalacje takie jak prosumenckie instalacje fotowoltaiczne czy stacje ładowania samochodów elektrycznych, znacznie komplikujące działanie sieci [2, 6]. Opracowanie technik zdolnych monitorować i w sposób elastyczny reagować na nagłe zmiany w zapotrzebowaniu na moc jest konieczne, aby zapewnić stabilny rozwój sieci energetycznych w niedalekiej przyszłości.

Jednym z rozwiązań automatycznej regulacji napięcia w sieciach *nn* jest system LVRSys, opracowany przez firmę A. Eberle GmbH, a dystrybuowany w Polsce poprzez firmę ASTAT. Rozwiązanie to jest alternatywą dla sieci dystrybucyjnych, w których spełniane jest zapotrzebowanie na moc, ale pojawiają się problemy z utrzymaniem właściwego poziomu napięć. Omawiany tu system składa się, z dwóch szeregowo połączonych transformatorów zdolnych do zmiany swoich wartości napięć po stronie wtórnej o ±4,5% i ±1,5%. Oba transformatory te poprzez odpowiednie sprzęganie i rozprzęganie poprzez układ złożony z triaków pozwala podwyższyć lub obniżyć wartość napięcia sieci od -6% do +6% z krokiem 1,5%, dając łącznie 9 różnych stopni pracy układu LVRSys [6].

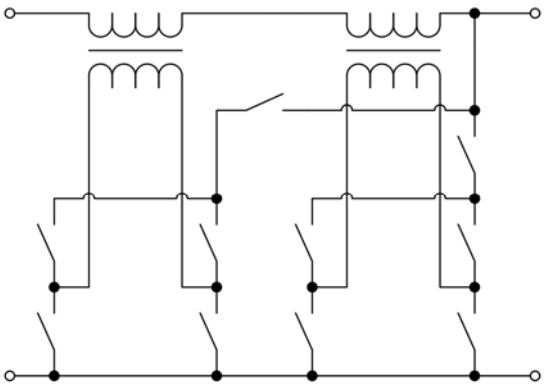
W niniejszej pracy Autorzy zrelacjonują wyniki badań związane z określeniem wartości parametrów elementów składowych układu LVRSys, włącznie z określeniem zasad dotyczących jego sposobu sterowania. Dane te następnie zostaną wykorzystane do budowy modelu systemu LVRSys w środowisku Matlab Simulink zdolnego wiernie symulować automatyczną pracę układu w reakcji na zmieniające się warunki w sieci zasilającej oraz zasilanej.

Koncepcja regulacji napięcia z wykorzystaniem transformatorów połączonych kaskadowo

System LVRSys to urządzenie oparte o zasadę działania transformatora dodawczego, którego uzwojenie wtórne zostaje włączone bezpośrednio w linię przesyłową sieci *nn*. Zastosowane transformatory są tak skonstruowane, aby napięcie znamionowe strony wtórnej wynosiło kilka woltów, co pozwala na regulację napięcia sieci *nn* w zakresie kilku procent jego wartości. Istnieje kilka sposobów konfiguracji transformatora dodawczego, do których należy połączenie

szeregowe stron wtórnych dwóch lub więcej transformatorów dodawczych, nazywane dalej połączeniem kaskadowym.

W połączeniu kaskadowym uzwojenia pierwotne transformatorów jest podłączane równolegle do sieci na wyjściu z układu za pomocą dwóch par triaków. Każda z par odpowiada za kierunek podłączenia transformatora. Odpowiednie załączenie triaków powoduje czy transformator będzie obniżał, czy podwyższał napięcie sieci. Czynnikiem decydującym o parametrach regulacji jest w tym przypadku napięcie znamionowe obu stron transformatora: strona pierwotna (zasilana z sieci) powinna mieć napięcie znamionowe odpowiadające 230 V, podczas gdy napięcie znamionowe strony wtórnej będzie wartością, o jaką napięcie sieci zostanie obniżone lub podwyższone. Należy zaznaczyć, że aby zachować parametry nominalne pracy systemu wymaganym jest, aby poziom napięcia w sieci oscylował wokół wartości znamionowej. Zastosowanie pojedynczego transformatora skutkuje brakiem możliwości szerokiej regulacji napięcia sieci, w takim przypadku koniecznym jest połączenie kaskadowo kilku transformatorów dodawczych o odmiennej wartości napięcia znamionowego uzwojenia wtórnego. Wówczas przy różnych kombinacji połączeń transformatorów można uzyskać kilka stopni regulacji [7]. Schemat ideowy regulacji kaskadowej został przedstawiony na rysunku 1.



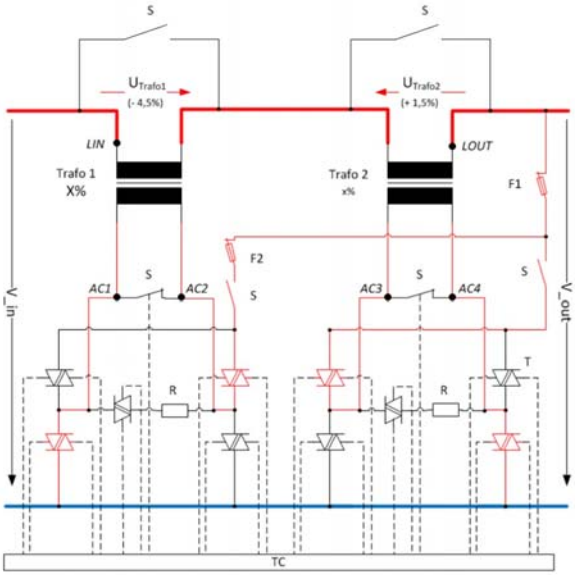
Rys.1. Schemat ideowy dwóch transformatorów oddawczych połączonych kaskadowo

Firma A. Eberle posiada w swoim asortymencie szereg modeli systemów LVRSys o różnych parametrach pracy. Model badany w ramach niniejszej pracy to system o prądzie znamionowym I_N = 200 A, mocy sieci 144 kVA i zakresie regulacji ±6%. Urządzenie przystosowane jest do niezależnej regulacji trzech faz sieci, gdzie na każdą z faz przypadają dwa transformatory, „*większy*” o przekładni 4,5% i „*mniejszy*” o przekładni 1,5%. Regulacja odbywa się poprzez załączanie transformatorów zgodnie, przeciwnie lub ich odpowiednią konfigurację. Ponieważ każdy transformator posiada trzy stany pracy (dodawczy, ujemny, jałowy), pozwala to na uzyskanie łącznie dla dwóch współpracujących ze sobą transformatorów 9 stopni regulacji napięcia z krokiem, co 1,5%, w sposób jaki ukazano w Tabeli 1.

W układzie uzwojenia wtórne obu transformatorów są szeregowo włączone w tor prądowy sieci, a wyindukowane w nich napięcia stanowią odpowiednio regulację napięcia sieci. Uzwojenia pierwotne transformatorów są dołączone do sieci *nn* równolegle na wyjściu z układu LVRSys. Załączanie transformatorów odbywa się za pomocą dwóch par triaków, gdzie każda para odpowiada za jeden z kierunków załączenia. Wyłączenie transformatora zostaje zrealizowane za pomocą modułu „*bypass'u*” włączonego równolegle do uzwojenia wtórnego transformatora. Uproszczony schemat ideowy układu LVRSys, na którym oparto koncepcję modelu symulacyjnego, została przedstawiona na rysunku 2.

Tabela 1. Stopnie regulacji napięcia systemu LVRSys

Stopień regulacji	Transformator ±1,5%	Transformator ±4,5%
+6%	+1,5%	+4,5%
+4,5%	0%	+4,5%
+3%	-1,5%	+4,5%
+1,5%	+1,5%	0%
0%	0%	0%
-1,5%	-1,5%	0%
-3%	+1,5%	-4,5%
-4,5%	0%	-4,5%
-6%	-1,5%	-4,5%



Rys.2. Schemat ideowy systemu LVRSys w trybie obniżającym wartość napięcia o 3%

Układ sterujący po wykryciu przekroczenia przez napięcie danego zakresu tolerancji, uruchamia system. Przełączenie następuje w chwili, gdy prąd w uzwojeniu pierwotnym przechodzi przez zero. Czas zadziałania systemu jest naturalnie ograniczony do 20 ms. Ponieważ zasada działania układu oparta jest na znajomości wartości skutecznych napięć, potrzebny jest pełen okres sygnału do ich obliczenia. Minimalny czas zadziałania układu wynosi zatem 30 ms, co jest również ważne przy przełączaniu transformatora 1,5% w stan przeciwny. Przejście z jednego stanu w drugi wymaga w tym przypadku pełnego wyłączenia transformatora, a następnie jego ponownego załączenia w zerze prądowym, po kolejnych 10 ms, tj. w połowie okresu.

Badanie układu LVRSys

W celu utworzenia modelu matematycznego układu konieczne było dokonanie badań laboratoryjnych na parze transformatorów stanowiących część roboczą LVRSys. Transformatory zostały poddane próbie zwarcia celem określenia wartości rezystancji i indukcyjności rozproszeń uzwojeń oraz badaniu stanu jałowego celem określenia charakterystyk magnesowania [rys. 3, 4]. Parametry znamionowe transformatorów zostały przedstawione w Tabeli 2, gdzie: U_1, I_1, U_2, I_2 – napięcia i prądy uzwojenia pierwotnego i wtórnego, f_n – częstotliwość znamionowa.

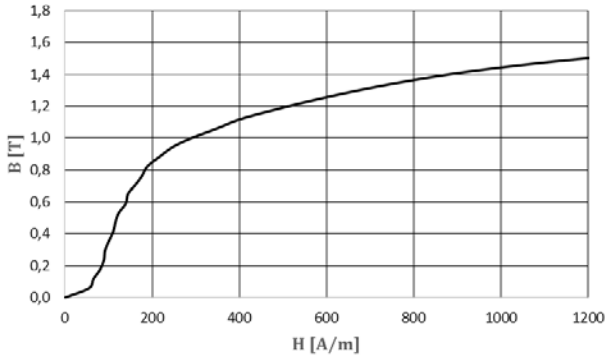
Parametry schematów zastępczych transformatorów wyznaczone na podstawie pomiarów zostały zestawione w Tabeli 3, gdzie R_1, X_1, R_2, X_2 – rezystancje i reaktancje uzwojenia pierwotnego i wtórnego, R_{fe} – rezystancja reprezentująca straty w rdzeniu, X_μ – reaktancja magnesowania rdzenia.

Tabela 2. Parametry znamionowe badanych transformatorów

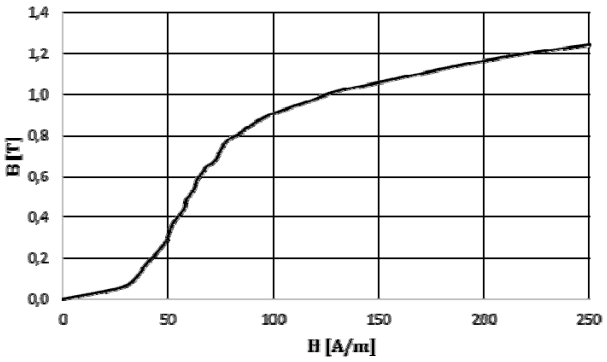
Parametr	Transformator 4,5%	Transformator 1,5%
U_1	230 V	230 V
I_1	9.88 A	3.38 A
U_2	10.35 V	3.45 V
I_2	207 A	207 A
f_n	47 - 63 Hz	47 - 63 Hz

Tabela 3. Parametry zastępcze badanych transformatorów

Parametr	Transformator 4,5%	Transformator 1,5%
R_1	0,52 Ω	2,45 Ω
X_1	0,24 Ω	0,65 Ω
R_2	1,10 mΩ	0,61 mΩ
X_2	0,50 mΩ	0,16 mΩ
R_{fe}	2077 Ω	2556 Ω
X_μ	2752 Ω	1035 Ω



Rys.3. Charakterystyka magnesowania transformatora 1,5%



Rys.4. Charakterystyka magnesowania transformatora 4,5%

Model numeryczny LVRSys w środowisku Simulink

Model symulujący do analizy stanów pracy systemu LVRSys wykonany w środowisku Matlab Simulink został przedstawiony na rysunku 5. System ten można podzielić na kilka odrębnych bloków, pełniących różne funkcje. System posiada dwa dynamiczne bloki pozwalające na symulację warunków pracy, które wpływają na wartość skuteczną napięcia sieci *nn*, a więc wymuszają na systemie zadziałanie. Część wykonawczą systemu stanowią tu dwa transformatory, wraz z zespołami triaków, które umożliwiają odwracanie, tj. odpowiednią polaryzację uzwojeń pierwotnych transformatorów, oraz tzw. „bypassy" bocznikujące uzwojenia wtórne transformatorów, gdy te nie są zaangażowane w regulację napięcia. Najbardziej złożonym elementem całego układu jest system sterowania, który na podstawie znanej wartości skutecznej napięcia decyduje o odpowiednim załączaniu transformatorów w określonej konfiguracji.

W celu symulacji napięcia regulowanego przez system LVRSys utworzone zostało dynamiczne źródło napięcia, w którym wartość skuteczna napięcia zmienia się z zadanym interwałem czasowym skokowo w zakresie 207V – 253V, zgodnie z granicznymi wartościami napięcia ustanowionymi przez normę. Dodatkowo, układ posiada stałe obciążenie sieci reprezentowane przez blok RLC. Moc obciążenia systemu została ustawiona na poziomie 1/3 mocy znamionowej sieci dla badanego modelu LVRSys i wynosi 48kVA. Charakter odbioru został określony, jako indukcyjno-rezystancyjny, o współczynniku mocy równym 0,7.

Badane transformatory, w modelu zostały odwzorowane z wykorzystaniem bloku Saturable Transformer z biblioteki Simscape. Blok ten pozwala na odwzorowanie ich pracy wraz z uwzględnieniem charakterystyk magnesowania.

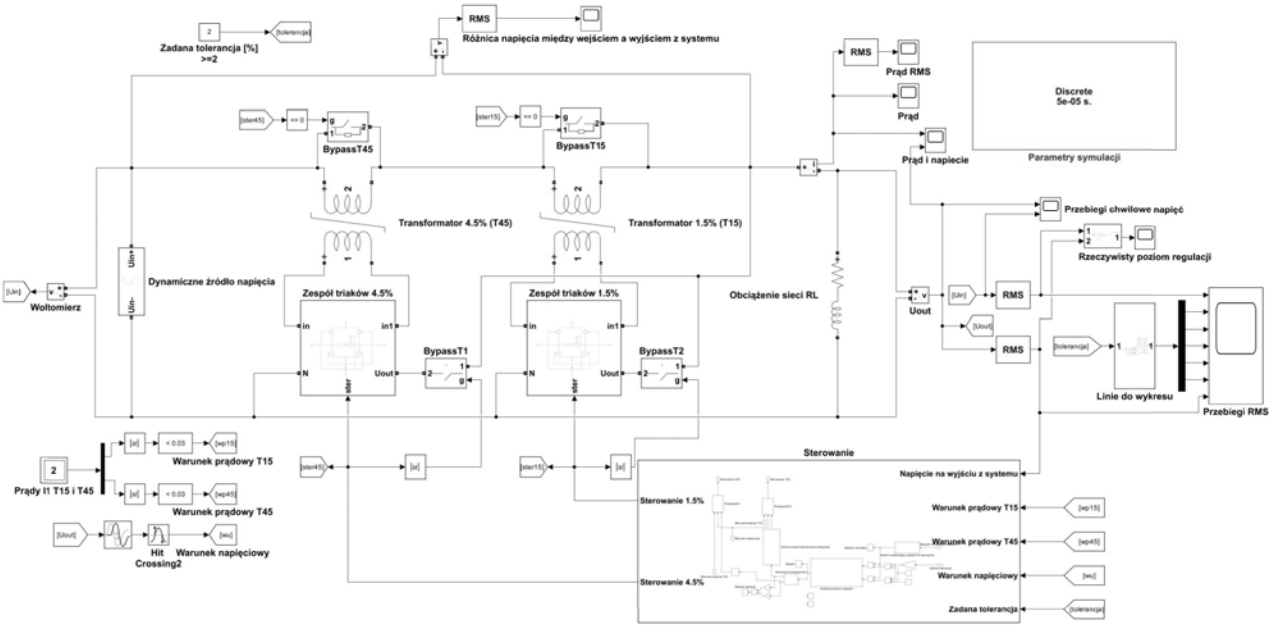
W systemie, transformatory są zasilane przez zespoły triaków, w których znajdują się dwie pary triaków, gdzie każda para odpowiada za kierunek włączenia uzwojenia pierwotnego, a więc za kierunek podbicia napięcia w uzwojeniu wtórnym. Dodatkowo, równolegle do uzwojenia pierwotnego znajduje się gałąź z rezystorem, załączana przez następny triak, kiedy uzwojenie nie jest zasilane z sieci. Zadaniem gałęzi jest rozładowanie prądu znajdującego się w uzwojeniu pierwotnym. Zespoły triaków włączone są do sieci przez kolejne triaki (na rysunku 5 reprezentowane przez T1 i T2), które odłączają dany transformator, gdy nie ma potrzeby jego załączenia.

Sterowanie układem LVRSys odbywa się w kilku etapach. Na początku dokonywany jest pomiar napięcia, następnie określana jest jego wartość skuteczna. Ze względu na fakt, że do obliczenia wartości skutecznej przedział czasowy całkowania musi mieć określoną długość, stanowiącą co najmniej jeden okresu lub jego wielokrotnością. Po zmianie wartości amplitudy sygnału konieczne jest odczekanie 20 ms, aż nowa wartość skuteczna zostanie określona. W tym celu został opracowany i wdrożony specjalny moduł „*uzdatniający*" napięcie do celów sterowania, analizujący, kiedy wartość skuteczna napięcia oddaje rzeczywista wartość napięcia sieci.

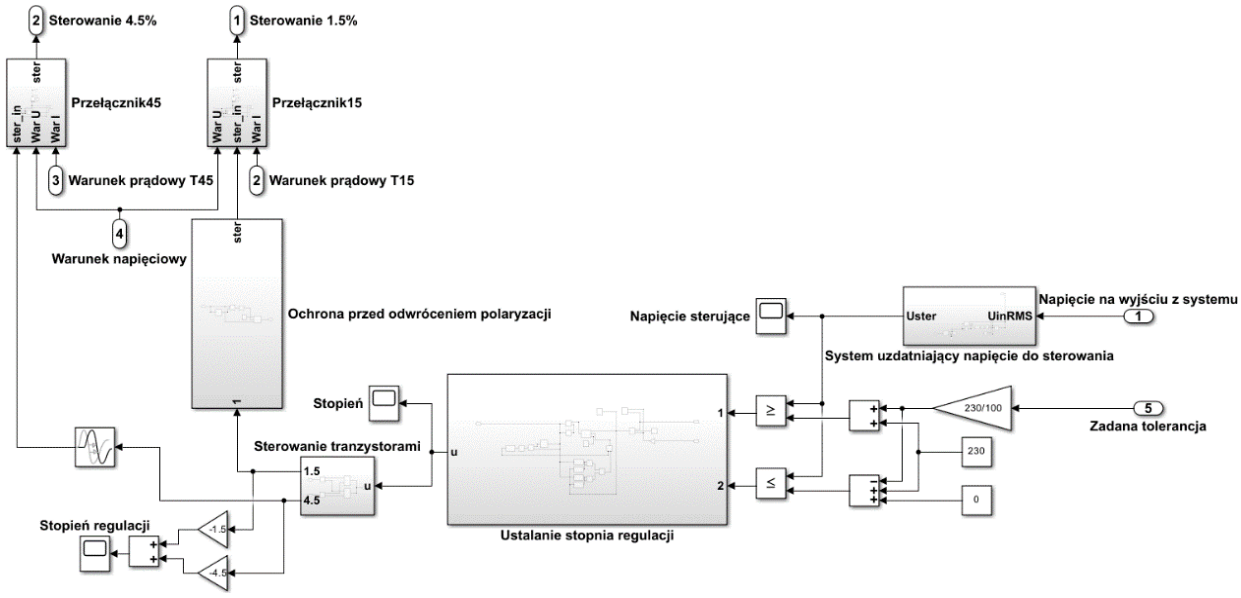
W ten sposób pozyskana wartość napięcia trafia następnie do bloku, który zajmuje się ustalaniem stopnia regulacji. System decyduje o potrzebie zmiany stopnia regulacji, gdy napięcie na wyjściu z układu przekroczy zadany próg tolerancji, który jest nie mniejszy niż 2% wartości napięcia znamionowego. Gdy wykryje potrzebę zmiany stopnia, podnosi lub obniża stopień regulacji, o ile nie jest on już maksymalny lub minimalny (±6%). W modelu stopnie regulacji przyjmują pozycje od -4 do 4. Komponentem niezbędnym na tym etapie regulacji jest moduł, który blokuje kolejne żądania zmiany stopnia regulacji na krótki odstęp czasu. Po zmianie stopnia regulacji następują krótko chwilowe aberracje w napięciu na wyjściu z układu, które mogłyby powodować kolejne żądanie zmiany stopnia regulacji w sytuacji, gdy nie jest to potrzebne.

Po wybraniu stopnia regulacji konieczne jest dobranie sygnałów sterujących zespołami triaków łączących strony pierwotne transformatorów z siecią. W systemie sterowania znajduje się element dobierający sygnał sterujący na podstawie zażądanego poziomu regulacji. W rzeczywistości sygnały sterujące triakami są typu logicznego, natomiast, w celu ułatwienia symulacji, sygnał sterujący przyjmuje trzy wartości (-1, 0, +1), odpowiadające trzem stanom pracy transformatora. Włączanie obwodu pierwotnego dokonywane jest w chwili, gdy napięcie na wyjściu z układu osiąga wartość szczytową. Jest to osiągane poprzez przesunięcie sygnału napięciowego o ćwierć okresu, a następnie wychwycenie chwili jego przejścia przez zero. Ze względu na to, że uzwojenia strony pierwotnej transformatorów podłączone są bezpośrednio do sieci *nn*, ich wyłączania należy dokonywać, gdy prąd w nich płynący jest możliwie bliski zeru. W symulacji jest to realizowane za pomocą

bloku wykrywającego przejście prąd przez „0”. Sytuacją dość *„uciążliwą”* dla układu jest sytuacja, gdy potrzebne jest odwrócenie polaryzacji transformatora 1,5% (T15). W takim przypadku, ze względu na występowanie dużej wartość indukcyjności po stronie pierwotnej transformatora, niedopuszczalnym jest bezpośrednia zmiana polaryzacji uzwojenia. Zwykle transformator jest przełączany ze stanu pracy (1 lub -1) w stan nieaktywny (0), a następnie po przekroczeniu połowy okresu (kolejne przejście przez zero prądowe) przełączany w stan przeciwny (-1 lub 1). Blok odpowiedzialny za sterowanie został przedstawiony na rysunku 6



Rys.5. Model systemu LVRSys w środowisku Matlab Simulink

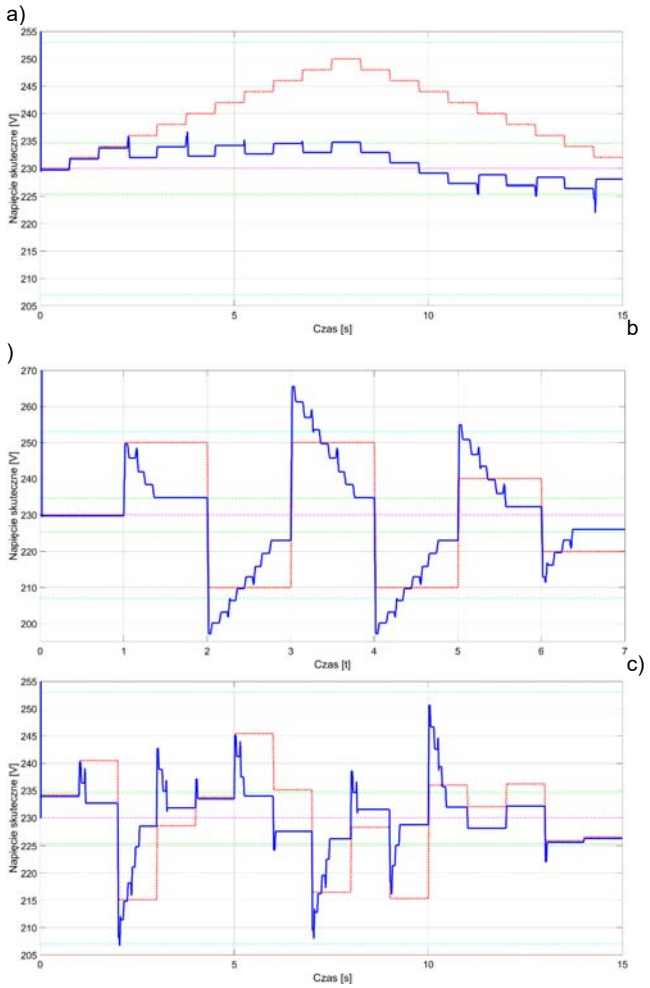


Rys. 6. Widok bloku sterowania pracą transformatorów

Wyniki symulacji stanów pracy systemu LVRSys

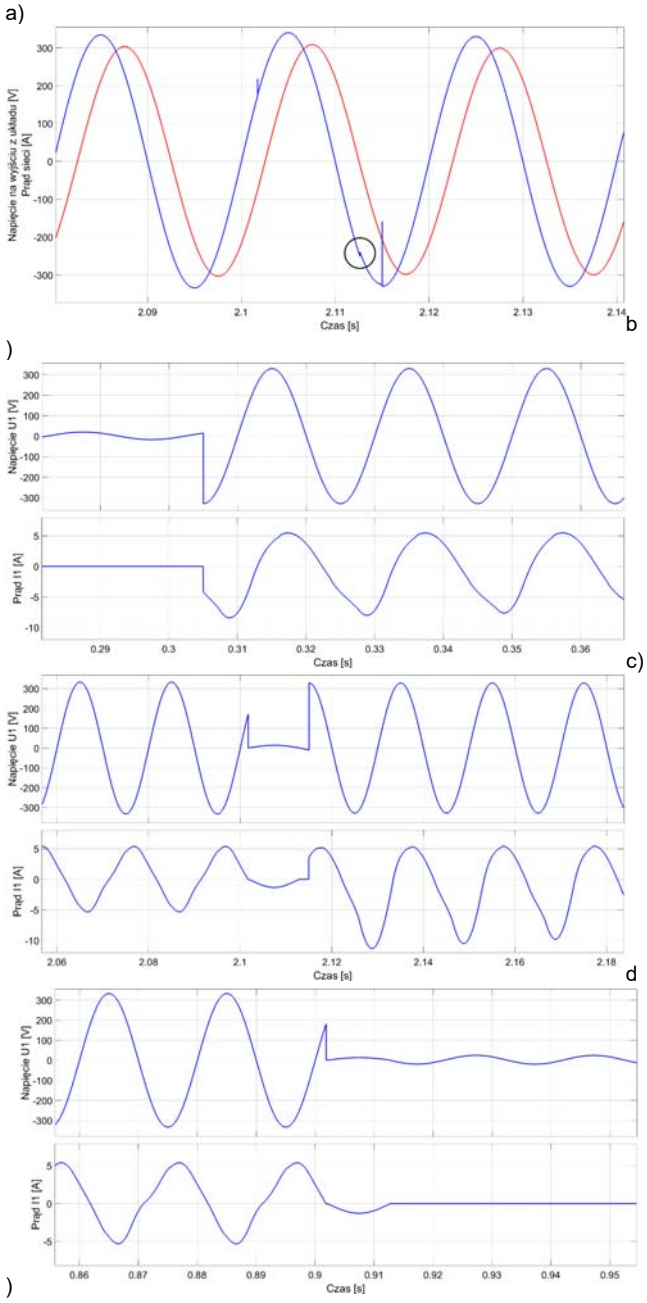
Wykorzystując opracowany modelu, Autorzy artykułu przeprowadzili dużą liczbę symulacji umożliwiających analizę stanów pracy systemu. Na potrzeby niniejszej pracy ograniczyli się jednak do zaprezentowania wybranych wyników symulacji. Wyniki pierwszej z serii symulacji, w której Autorzy obserwowali wartości skuteczne napięć na wejściu i wyjściu układu, przedstawiono na rysunku 7. Dla napięcia sieci o wartości skutecznej: a) rosnącej, a następnie malejącej schodkowo, co 0,75 s z krokiem 2 V, od 230 do 250 V; b) zmieniającej się skokowo, co sekundę pomiędzy między 250V a 210 V; c) zmieniającej się skokowo, co 1s, w granicach ± 20 % wartości napięcia znamionowego U_n, zgodnie z rozkładem Gaussa. Dla wszystkich zrealizowanych symulacji granice tolerancji dla układu sterowania wynosiły ± 2 % od U_n, a więc zakres tolerancji wynosił 225,4 – 234,6 V. Na podstawie symulacji zaobserwowano szybką reakcję układu na zmianę i przekroczenie wartości napięcia. Można tu zauważyć, że badany system LVRSys jest wstanie dokonać stosownej zmiany stopnia regulacji w ciągu ułamka sekundy. W przypadku, gdy wartość napięcia przekracza dopuszczalny przedział napięć (rys. 7b), na reakcję system potrzebował

ok. 0,1 s. W systemie na sztywno ustawiono czas regulacji napięcia powyżej wartości dopuszczalnej w celu uniknięcia problemów związanych z doborem czasu ustalania się wartości skutecznej napięcia na wyjściu systemu. Ponadto układ umożliwia również regulacje pełnego przeregulowania (tj. zmianę stopnia regulacji z maksymalnie ujemnego w maksymalnie dodawczy lub odwrotnie). Orientacyjny czas potrzebny na redukcję wartości napięcia w pobliże wartości 230V, w tym przypadku wynosił ok. 0,8 s, umożliwiając tym samym względnie szybki powrót napięcia do wartości znajdujących się w zakresie wymogów normy [1].



Rys.7. Przebiegi wartości skutecznej napięcia na wejściu układu (czerwony) i napięcia po regulacji (niebieski) dla wartości skutecznej napięcia sieci: a) rosnącej i malejącej schodkowo, b) zmieniającej się skokowo w sposób dynamiczny, c) zmieniającej się skokowo z sposób losowy.

W drugiej serii symulacji Autorzy obserwowali wartości chwilowe napięć i prądów w układzie. Na potrzeby artykułu przedstawione zostały przebiegi wartości chwilowych napięcia i prądu na wyjściu z układu oraz w transformatorze 1,5%, jako że przebiegi w transformatorze 4,5% przebiegały w sposób analogiczny. Napięcie źródła, podczas symulacji było ustawione, jako źródło idealnie sinusoidalne o wartości 230 V. Zmiana stopnia regulacji była wymuszana, co 0,3 s, niezależnie od napięcia na wyjściu z układu, przez czas 3 s symulacji. Regulacja napięcia zmieniała się w zakresie od 0% do +6%. Na rysunku 8 przedstawione zostały przebiegi napięcia i prądu: a) na wyjściu z układu LVRSys widziane od strony odbioru w sytuacji, gdy stopień regulacji układu zmienia się między poziomami +3% i +1,5%; b) po stronie pierwotnej transformatora T15 w chwili jego załączenia; c) po stronie pierwotnej transformatora T15 podczas przejścia ze stanu ujemnego w stan dodawczy, i d) w chwili wyłączenia transformatora T15 po stronie uzwojenia pierwotnego.



Rys.8. Przebiegi wartości chwilowej napięcia (górny) i prądu (dolny): na wyjściu z systemu LVRSys w chwili zmiany stopnia regulacji z +3% na +1,5% (a); oraz przebiegów wartości chwilowej napięcia (górny) oraz prądu (dolny): po stronie uzwojenia pierwotnego T15, w chwili: jego załączenia (b); przełączenia transformatora ze stanu ujemnego w dodawczy (c); oraz podczas jego wyłączenia (d).

Na powyżej zamieszczonych przebiegach napięć można zauważyć chwilę, w której T15 jest odłączany (nieznaczny skok napięcia) oraz chwilę jednoczesnego załączenia T15 i T45, skutkującą znacznym kokiem napięcia i zmniejszeniem lub zwiększeniem się amplitudy napięcia. Autorzy zauważyli, że przełączenie transformatora skutkuje krótkotrwałym skokiem napięcia w chwili zmiany stanu pracy transformatora, z pomijalnie małym wpływem na prąd płynący w sieci. Ponadto, na rysunku 8b) można zauważyć, że załączenie transformatora odbywa się głównie w szczycie wartości napięcia, a więc w chwili pokrywającej się z przejściem prądu przez zero, w celu zapewnienia

najłagodniejszego załączenia. Z kolei, na przebiegach zestawionych na rysunku 8c) przedstawiona została chwila obrazująca zmianę kierunku załączenia uzwojenia pierwotnego transformatora. Początkowo, dane uzwojenie zostaje odłączone w zerze prądowym, pozwalając na rozładowanie energii zgromadzonej na indukcyjności, po czym transformator zostaje załączony w maksimum napięcia w kierunku przeciwnym. Zmiana polaryzacji widoczna jest na przebiegu napięcia: napięcie po przełączeniu jest przesunięte o 180° względem napięcia przed jego przełączeniem. Na przebiegach przedstawionych na rysunku 8d) ukazane zostały przebiegi napięć i prądów strony pierwotnej T15 w chwili jego wyłączenia. Wyłączenie nastąpiło w chwili, gdy prąd uzwojenia osiąga wartość równą zeru.

Podsumowanie

W pracy Autorzy szczegółowo omówi pojawiający się w ostatnich latach problem silnie związany z utrzymaniem odpowiednich wartości napięć sieci niskiego napięcia (*nn*). Szczególną uwagę zwrócono na system automatycznej regulacji wartości napięcia LVRSys zaproponowany przez firmę A. Eberle GmbH. Na podstawie istniejącego systemu wykonano serię pomiarów najważniejszych komponentów składowych systemu, tu transformatorów dodawczych, pozwalających na wyznaczenie wartości parametrów zastępczych badanych transformatorów. Uzyskane na tej podstawie parametry pozwoliły Autorom na dalsze prace związane z opracowaniem i wdrożeniem numerycznego modelu omawianego systemu LVRSys w środowisku Matlab/Simulink. W pracy Autorzy przedstawili wybrane wyniki obliczeń ukazujące pracę systemu automatycznej regulacji napięcia. Obecnie Autorzy koncentrują się na badaniach oraz realizacji pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Wyniki uzyskane na tym polu zostaną porównane z wynikami uzyskanymi na modelu symulacyjnych i zrelacjonowane na dalszym etapie prac badawczych.

***Autorzy**: inż. Filip Staszak, Politechnika Poznańska, E-mail: filip.stasz00@gmail.com; dr inż. Andrzej Książkiewicz, ASTAT Sp. z o.o., ul. J. H. Dąbrowskiego 441, 60-451 Poznań, E-mai: a.ksiazkiewicz@astat.pl; dr hab. inż. Rafał M. Wojciechowski prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: rafal.wojciechowski@put.poznan.pl.*

LITERATURA

[1] Energetyka, Dystrybucja i Przesył, *Raport Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej* (2022), praca zbiorowa.

[2] Polska Norma PN-IEC 60038,

[3] Cieślik S., Regulacja napięcia w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia z mikroinstalacjami, *XVII Sympozjum Współczesne Urządzenia oraz Usługi Elektro-energetyczne, Telekomunikacyjne i Informatyczne*, Poznań, 19-20 Listopad 2014 r. (2014).

[4] Dyson J., Voltage regulation by changing transformer tapings on-load, *Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers*, 51(1960), No. 4, pp. 88-104, 1960.

[5] Mnich T., Regulacja napięcia w transformatorach rozdzielczych sieci nn z dużym nasyceniem OZE oraz niesymetrycznych odbiorników jednofazowych, *Elektro Info*, Nr 7-8(2021), s. 18-22.

[6] Instrukcja użytkowa systemu LVRSys, on-line https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2021/06/BA_LVRSys-Standard 180.1000.2xxx_EN_V_1.10.pdf, 15/05/2021 [access: 04.2023].

[7] Holt, M., Grosse-Holz G., Rehtanz Ch. Line voltage regulation in low voltage grids, *CIRED Workshop*, Ljubljana, Slovenia, 7-8 June 2018, (2018).