

Regulacja napięcia w sieci nn z wykorzystaniem transformatora z podobciążeniowym przełącznikiem zacze- pów w oparciu o pomiary z liczników AMI

Streszczenie. Artykuł prezentuje wdrożenie systemu regulacji napięcia w sieci nn z wykorzystaniem transformatora SN/nn wyposażonego w podobciążeniowy przełącznik zacze- pów. Istotą prezentowanego rozwiązania jest regulacja na podstawie pomiarów pozyskiwanych z komunalnych liczników energii elektrycznej w głębi sieci nn. Przedstawiono ideę, podstawowe algorytmy oraz doświadczenia eksploatacyjne.

Abstract. This article presents voltage regulation system implementation in LV grid, using MV/LV transformer equipped with On-Load Tap Changer. The point of solution is regulation based on measurements from AMI meters installed in consumers and prosumers, deep in the LV grid. (LV regulation using MV/LV transformer with on-load tap changer, based on voltage measurements from AMI meters).

Słowa kluczowe: sieć niskiego napięcia, podobciążeniowy przełącznik zacze- pów, regulacja napięcia, system AMI.

Keywords: low voltage grid, on-load tap changer, voltage regulation, AMI.

Wstęp

Wzrost ilości mikroinstalacji fotowoltaicznych (PV) wywołuje obserwowany od kilku lat problem przekraczania wartości napięć w sieci niskiego napięcia (nn) powyżej wartości dopuszczalnych i asymetrię napięć fazowych, skutkujące spontanicznym wyłączeniem i załączeniem falowników PV. Jednocześnie obserwuje się spadki napięcia poniżej wartości dopuszczalnych w sieciach z dużymi obciążeniami. Prowadzi to do znacznych różnic napięć w obserwowanych w tej samej chwili w różnych punktach sieci, zasilanej ze wspólnej stacji SN/nn.

Zgodnie z danymi publikowanymi przez Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej (ptpiree.pl), skupiające m.in. spółki dystrybucyjne (OSD), w połowie roku 2023 r. do krajowej sieci energetycznej były przyłączone mikroinstalacje o mocy ponad 10 GW, co stanowi ok. 15% mocy zainstalowanej w krajowym systemie energetycznym [1]. Problem wynikający z istnienia tej generacji wskazano w pierwszym akapicie wstępu.

W ciągu ostatnich lat zaproponowano kilka rozwiązań mających zaradzić problemowi, m.in.:

- regulację napięcia na transformatorze w GPZ [2],
- symetryzację napięcia z wykorzystaniem układów działających na zasadzie falownika włączonego do linii nn [3],
- dołączenie do linii nn transformatorów dodawczych [4] lub symetryzujących [5];
- zastosowanie transformatorów zasilających SN/nn z podobciążeniowym przełącznikiem zacze- pów [6].

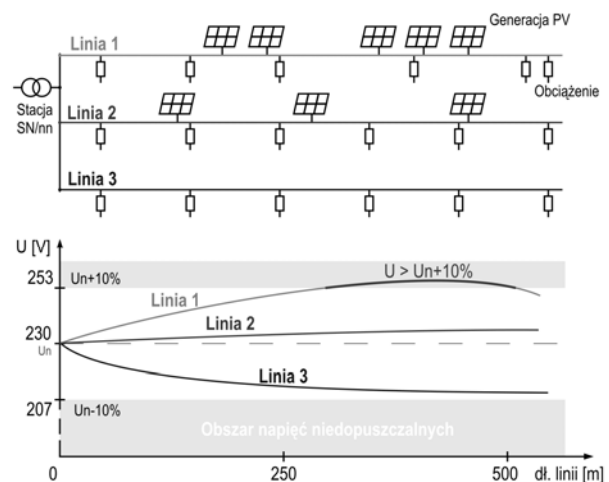
Przedstawione rozwiązanie rozwija ideę regulacji napięcia z wykorzystaniem transformatora z podobciążeniowym przełącznikiem zacze- pów (PPZ, ang. *OLTC* – *On-Load Tap Changer*). Pomiar napięcia realizowany jest w wielu punktach w głębi sieci nn i pochodzi z elektronicznych liczników konsumentów i prosumentów włączonych do scentralizowanego systemu odczytowego (AMI).

Rozwiązane wdrożono w trzech stacjach SN/nn, zmodernizowanych w ramach projektu europejskiego EUniversal Horizon 2020 [7]:

- Linia Szkoła – słupowa 250 kVA, PV 109 kW,
 - Czajków – słupowa 400 kW, PV 53 kW,
 - Mława Podmiejska – wnetrzowa, 400 kW, PV 420 kW,
- Koncepcję tych stacji omówiono w literaturze [8], a także w materiałach konferencyjnych [9][10].

Algorytm regulacji

Problem przekraczania napięć w sieci nn pokazano na rysunku 1. Obecność generacji (PV lub innej) powoduje wzrost napięcia w linii. Natomiast w linii obciążonej, przy braku generacji, napięcie maleje wraz z oddalaniem od źródła zasilania (stacji SN/nn).



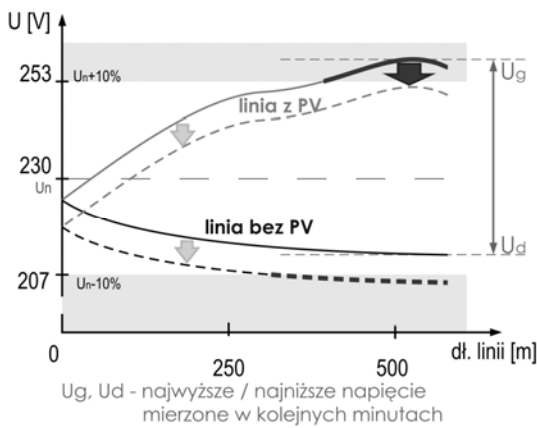
Rys. 1. Napięcia w głębi sieci nn przy dużym nasyceniu PV

Przyjęto dwa kryteria regulacji napięcia wykorzystujące transformator z PPZ:

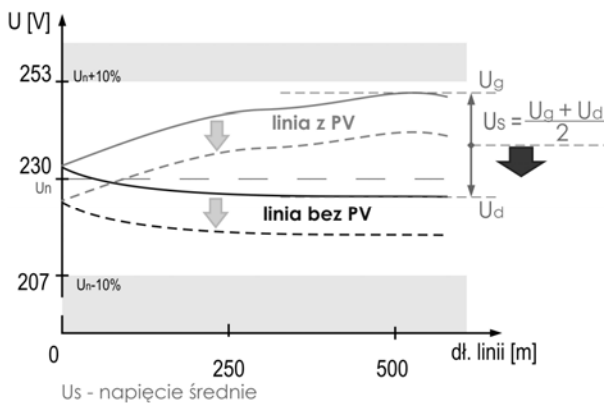
1. eliminacja przekroczeń poza zakres $\pm 10\%$ napięcia znamionowego U_n (rys. 2) – regulacja szybka,
2. utrzymanie napięcia w sieci na poziomie znamionowym (rys. 3) – regulacja wolna.

Kryterium eliminacji przekroczeń ma priorytet wyższy i musi uwzględniać powiązane ze sobą warunki dodatkowe:

- Jeśli różnica napięć między napięciem najwyższym i najniższym jest większa niż zakres określony progami $\pm 10\% U_n$ (46 V) istotniejsza jest eliminacja przekroczeń powyżej 253 V kosztem dopuszczenia do obniżenia napięcia poniżej 207 V w innych miejscach sieci.
- Jeśli w jakimś punkcie sieci napięcie jest niższe niż 207 V, algorytm najpierw powinien sprawdzić, czy podniesienie napięcia w sieci nie spowoduje przekroczenia górnego progu 253 V w innym jej punkcie.



Rys.2. Algorytm eliminacji przekroczeń



Rys.3. Algorytm utrzymania napięcia znamionowego

Kryterium utrzymania napięcia znamionowego opiera się na obliczaniu napięcia średniego U_s (z pomiarów napięcia najwyższego U_g i najniższego U_d w danej chwili) i przełączania zaczeów w kierunku minimalizacji różnicy między wyliczonym napięciem średnim U_s . W praktyce, aby nie dopuścić do nadmiernej liczby przełączeń, należy określić strefę nieczułości i zwłokę czasową między kolejnymi przełączeniami. Gdy napięcie U_s znajdzie się w strefie nieczułości wokół U_n , kolejne przełączenia nie są wykonywane do czasu wyjścia poza strefę. Kryterium eliminuje również niektóre potencjalne przekroczenia $\pm 10\% U_n$, zanim w istocie do nich dojdzie.

Ponadto należy wziąć pod uwagę minimalny czas między przełączeniami. W danych katalogowych zastosowanego przełącznika [6] określono trwałość PPZ na 500 tys. przełączeń. Przyjmując średni okres eksploatacji 25 lat oraz założenie, że większość przełączenia będą wykonywane w miesiącach ciepłych (kwiecień – wrzesień) i w godzinach dziennych (12 h), minimalny czas między przełączeniami nie powinien być krótszy niż ok. 6 minut.

Pomiary w głębi sieci nn

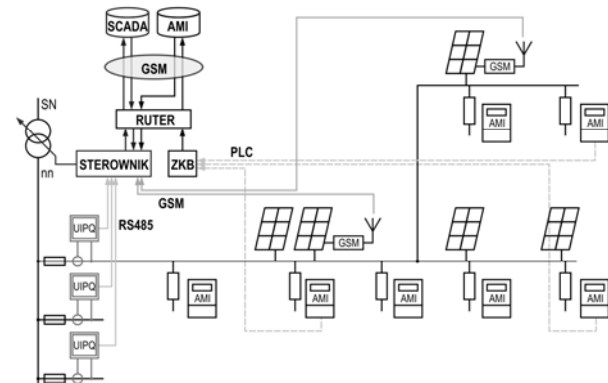
Zespół sterowania dostarczany z PPZ posiada własny algorytm regulacji, korzystający z pomiaru napięcia w stacji. Pomiar ten jest niewystarczający do skutecznego wdrożenia opisanego algorytmu i konieczne jest dokonywanie pomiarów w głębi sieci. Zespół sterowania PPZ pozwala na przełączanie zaczeów poleceniami z urządzenia zewnętrznego (np. sterownika stacyjnego).

W literaturze przedstawione są m.in. układy, w których napięcia mierzone są w złączach kablowych i transmitowane do stacji łączem GSM [11]. W tym rozwiązaniu zaproponowano wykorzystanie pomiarów z liczników AMI zainstalowanych u odbiorców. Liczniki te,

poza energią, mierzą i udostępniają również napięcia fazowe, z wystarczającą rozdzielczością, tj. 1 V. Pomiaru te są dostępne właściwie we wszystkich punktach sieci, w tym krytycznych, tj. w miejscach przyłączenia generacji (napięcia najwyższe) i na końcach linii, obciążonych bez generacji (napięcia najniższe).

Dla skutecznej eliminacji przypadków odłączania falowników na skutek przekroczenia napięcia progowego 253 V konieczne jest mierzenie napięcia z rozdzielczością czasową około 1 minuty, ponieważ wyłączenie falownika następuje w czasie nie dłuższym niż 10 minut od przekroczenia progu [12]. Napięcie w falowniku jest obliczane jako wartość skuteczna uśredniona w oknie 10 minutowym.

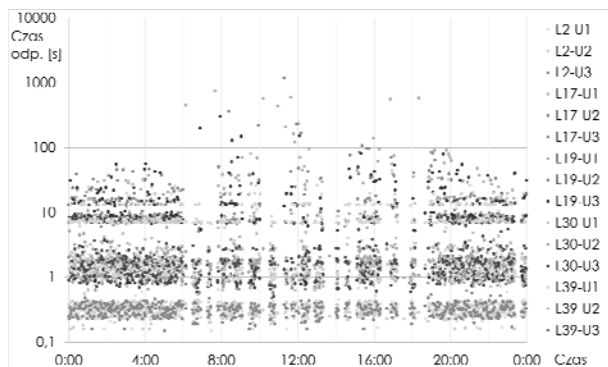
Odczyt liczników AMI realizowany jest w technice PLC (ang. *Power Line Communication*), czyli z transmisją sygnałów w przewodach roboczych linii nn, w pasmie częstotliwości 3-95 kHz (tzw. pasmo CENELEC A). Mimo obowiązywania normy [13] na poziom zakłóceń w tym pasmie, obserwuje się przerwy w odczycie liczników. W związku z tym, jako alternatywne źródło pomiarów, przewidziano zastosowanie mierników na odejściach nn stacji. Ponadto w jednej z lokalizacji nawiązano współpracę z kilkoma prosumentami celem zdalnego odczytywania napięć z ich falowników przez łącze GSM. Schemat systemu odczytowego pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Infrastruktura pomiarowa

Ze względu na wymogi cyberbezpieczeństwa (rozdział infrastruktury AMI i dyspozytorskiej - SCADA), dane z liczników AMI, odczytywane przez lokalny koncentrator w stacji (ZKB – zestaw koncentratorowo-bilansujący), nie są dostępne dla sterownika bezpośrednio (oba urządzenia przyłączone są do wspólnego rutera), ale pośrednio – przez serwer AMI spółki energetycznej.

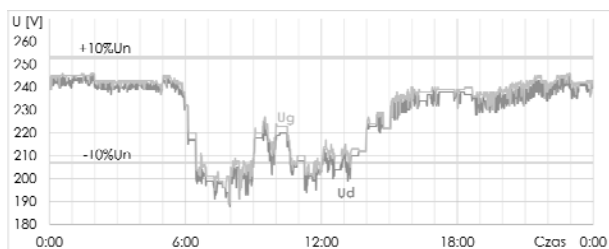
Z uwagi na specyfikę dostępu do danych AMI (brak możliwości jednoczesnego odczytywania dużej liczby liczników celem automatycznego wyboru napięć skrajnych) w projekcie dokonano analizy sieci nn i wskazano krytyczne miejsca pomiarów. Następnie wykonano próby odczytu liczników znajdujących się w tych punktach oraz liczników sąsiednich. Ostatecznie dla każdej lokalizacji wyselekcjonowano kilka (5-7) liczników, dla których możliwy był bieżący odczyt, tzn. odpowiedzi na zapytania przychodziły w czasie krótszym niż 1 minuta. Na rys. 5 pokazano przykład statystycznego rozkładu czasu odpowiedzi na zapytania o napięcie z 5 liczników w miejscowości Czajków w dniu 29 listopada 2022 r. Poza licznikiem L17, który odpowiadał bardzo rzadko, większość pomiarów była dostępna w sterowniku w czasie ok. 10 s od zapytania. Jednakże widoczne są okresowe przerwy w odczytach z pozostałych liczników.



Rys.5. Statystyka odczytu liczników AMI, Czajków, 29.11.2022 r.

Badania modelowe

W okresie od listopada roku 2022 do stycznia roku następnego rejestrowano pomiary z wybranych przednio liczników energii i na tej podstawie wyznaczono początkowe nastawy do regulacji. Ze względu na brak generacji w okresie badań jako źródło pomiarów przyjęto lokalizację Czajków, w której zaobserwowano regularne spadki napięcia poniżej progu 207 V, spowodowane załączaniem energochłonnych maszyn w okolicznych firmach (m.in. produkcja palet). Przykład rejestracji napięcia z tego samego dnia 29 listopada 2022 r. pokazano na rysunku. 6. Przebieg U_g odzwierciedla pomiar najwyższy, a U_d – pomiar najniższy w danej minucie.



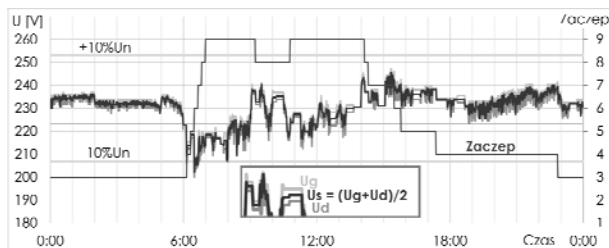
Rys. 6. Pomiar napięcia AMI, Czajków, 29.11.2022 r.

Pomiary są z rozdzielczością minutową. W okresach, w których nie odczytano liczników (odcinki poziome widoczne na rysunku. 5) przyjęto, że utrzymywane jest napięcie z minuty poprzedniej.

Na rysunku 7 pokazano symulację działania PPZ dla utrzymania napięcia wg zaproponowanych kryteriów. Przyjęto następujące nastawy algorytmu regulacji:

- szerokość strefy nieczułości: $\pm 3\% U_n$ (regulacja wolna),
- czas zwłoki regulacji wolnej: 10 minut,
- eliminacja przekroczeń: $\pm 10\% U_n$ (regulacja szybka),
- czas zwłoki regulacji szybkiej: 6 minut.

Czasy zwłoki liczone są od chwili przekroczenia danego progu. Jeśli napięcie wróci do obszaru dopuszczalnego przed upływem nastawionego czasu, licznik jest kasowany.



Rys. 7. Symulacja regulacji PPZ, Czajków, 29.11.2022 r.

Trzy widoczne przebiegi to napięcia najwyższe U_g , najniższe U_d oraz średnia U_s tych napięć. Linie poziome

powyżej i poniżej napięcia $U_n = 230 \text{ VAC}$ (nieoznaczone) wyznaczają strefę nieczułości $\pm 3\% U_n$. Progi eliminacji przekroczeń oznaczono $0,9U_n$ i $1,1U_n$. Linia łamana odpowiada numerowi zaczepek, wg dodatkowej skali po prawej stronie wykresu. Zaczep neutralny, odpowiadający przekładni znamionowej $15,75 \text{ kV} / 420 \text{ V}$, ma nr 5.

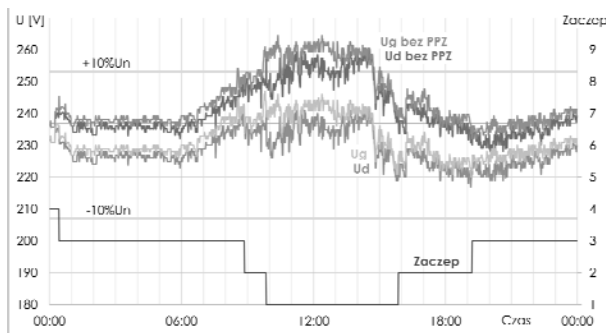
Wynik symulacji jest zgodny z oczekiwaniami. Znaczna obniżka napięcia (190 V) kilka minut po godzinie 6:00 została zlikwidowana ze zwłoką wynikającą z nastawy regulacji szybkiej. W dalszej części dnia napięcie utrzymywane jest w strefie nieczułości.

Wyniki działania układu regulacji

Urządzenia zostały uruchomione na przełomie wiosny i lata 2023 r, z nastawami wyznaczonymi w trakcie badań. W pierwszym okresie eksploatacji uwidocznił się problem zbyt dużej zwłoki w reakcji na przekroczenia górnego progu napięcia w regulacji szybkiej ($+10\% U_n$). Na podstawie przebiegów napięć oceniono, że dochodzi do wyłączenia falowników u prosumentów, zanim algorytm regulacji PPZ przełączy zaczep. Zwłoka wynika z szybszego działania zabezpieczenia nadnapięciowego w falownikach [12]. Zdecydowano o zastosowaniu algorytmu '2 z 3', w którym przełączenie następuje, jeśli w ciągu trzech minut nastąpią dwa przekroczenia napięć. Przy jednoczesnej rozdzielczości czasowej pomiarów przełączenie nastąpi w ciągu 2 lub 3 minut od przekroczenia progu.

Poniżej zaprezentowano przykład działania według algorytmu '2 z 3', zarejestrowane we wrześniu 2023 r. Dla pokazania efektów jego działania wykonano matematycznie czynność odwrotną w stosunku do przeprowadzonych wcześniej symulacji i odtworzono przebieg napięć, dla byłby dla przekładni znamionowej (zaczep nr 5).

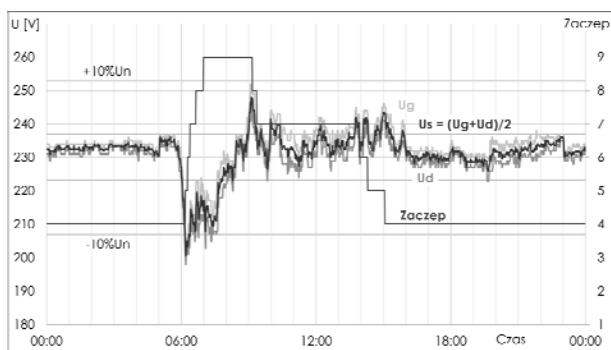
Na rysunku 8 pokazano działanie układu regulacji napięcia w stacji Linia Szkoła, w dniu 17 września (niedziela). Regulacja przebiega prawidłowo, napięcie średnie mieści się w strefie nieczułości. Przełącznik pracuje w zakresie od 1 do 4 zaczepek, a więc w obszarze obniżania napięcia o 4-14 V. Brak regulacji PPZ (zaczep na pozycji 5) spowodowałby przekroczenia napięcia w godzinach 10-15, o ok 10 V, czego skutkiem byłoby wyłączenia falowników.



Rys. 8. Regulacja PPZ, Linia Szkoła, 17.09.2023 r.

Praca układu regulacji w stacji Czajków przedstawiona jest na rysunku 9 (13 września 2023 r, środa). Widoczne jest znaczne obniżenie napięcia o godzinie 6 rano, gdy pracę rozpoczynają lokalne przedsiębiorstwa produkcyjne. Dla minimalizacji zapadu napięcia regulator szybko podnosi napięcie z poziomu 200 V do strefy nieczułości wokół U_n (5 kroków, od 4 do 9). Około godziny 10-tej widoczne jest zwiększenie generacji ze źródeł fotowoltaicznych skutkujące podwyższeniem napięcia średniego w sieci ponad strefę nieczułości. Regulator redukuje ten wzrost przełączając transformator na zaczep 7.

Na rysunku 10 pokazano symulację braku PPZ. Obniżka napięcia poniżej 207 V trwa znacznie dłużej (ponad 2 h).

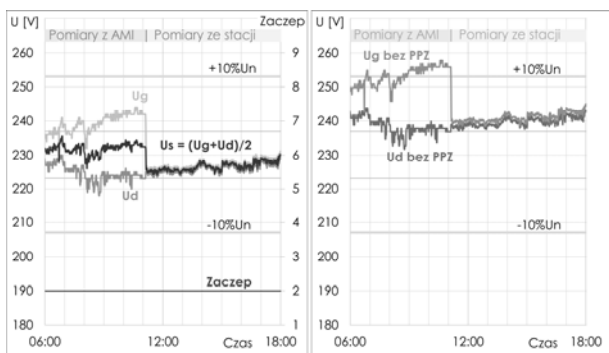


Rys. 9. Regulacja PPZ, Czajków, 13.09.2023 r.



Rys. 10. Symulacja braku regulacji PPZ, Czajków, 13.09.2023 r.

Działanie układu regulacji w stacji Mława Podmiejska pokazano na rysunku 11. W tej lokalizacji jedna z linii nn długości kilkuset metrów zasila osiedle 57 domów szeregowych, a na dachu każdego z nich zabudowana jest instalacja fotowoltaiczna. Sumaryczna moc instalacji PV wynosi ponad 400 kW. Od lipca do września 2023 r. transformator pracował na zaczepekach 1-3 (w zakresie obniżania napięcia). W prezentowanym dniu (wykres lewy) transformator pracował na zaczepek 2, napięcie średnie mieściło się w granicach strefy nieczułości. Gdy brak regulacji PPZ przekraczany jest próg 253 V (wykres prawy).



Rys. 11. Regulacja i symulacja braku PPZ, Mława, 13.09.2023 r.

O godzinie 11 nastąpiła utrata komunikacji z licznikami AMI, a układ regulacji przełączył się na pomiary ze stacji. Uwidacznia się tu korzyść z zastosowania pomiarów z liczników AMI – w pomiarach stacyjnych nie widać różnic napięć które występują w sieci. W szczególności, nie uwidacznia się podwyższone napięcie najwyższe w sieci U_g spowodowane załączeniem generacji fotowoltaicznych i wzrost napięcia średniego U_s . Napięcia w stacji mają wartość ok. 225 V, z niewielkim rozrzutem związanym z asymetrią faz.

Wnioski

Układ prawidłowo reguluje napięcie w sieci, reagując na zmiany generacji i obciążeń. Kluczową rolę odgrywa tu działanie w oparciu o pomiary napięć w głębi sieci.

Pomiary z liczników AMI są skutecznym źródłem napięć dla algorytmu regulacji z rozdzielczością jednodominutową, mimo obserwowanych przerw w łączności PLC.

W przypadku zaniku danych z głębi sieci, regulacja odbywa się na podstawie pomiarów napięć w stacji. W tym pomiarze nie uwidaczniają się zmiany napięć u odbiorców, stąd regulacja musi działać w oparciu o inne nastawy.

Przy doborze nastaw algorytmu regulacji (sposób wyznaczenia wielkości kryterialnej, jej wartość i czas zwłoki) należy wziąć pod uwagę dynamikę zmian napięcia wywołaną warunkami lokalnymi danej sieci.

Podziękowania: Opisane rozwiązanie zostało wdrożone w ramach projektu UE „Market enabling the interface to unlock flexibility solutions for cost-effective management of smarter distribution grids”, który otrzymał dofinansowanie z programu badań i innowacji Horyzont 2020 w ramach umowy o dotację nr 864334.

Autorzy: mgr inż. Łukasz Kajda, Instytut Energetyki O/Gdańsk, ul. M. Reja 27, 80-870 Gdańsk, E-mail: L.Kajda@ien.gda.pl; inż. Sebastian Samul, Instytut Energetyki O/Gdańsk, ul. M. Reja 27, 80-870 Gdańsk, E-mail: S.Samul@ien.gda.pl.

LITERATURA

- <http://www.ptpiree.pl/energetyka-w-polsce/energetyka-w-liczbach/mikroinstalacje-w-polsce> (dost. 19.10.2023 r.)
- Wcisło R., Regulacja napięcia w stacjach WN/SN uwzględniająca wpływ OZE, *III Konferencja Linie i stacje elektroenergetyczne, PTPIREE*, 5-6 października 2022 r., Wisła
- Krzemiński Z., Warunki wykorzystania mikroinstalacji OZE do stabilizacji napięcia w sieciach nn, *III Konferencja Linie i stacje elektroenergetyczne, PTPIREE*, 5-6 października 2022 r., Wisła
- Staszak F., Książkiewicz A., Wojciechowski R.M., System automatycznej regulacji napięcia (LVRSys) przewidziany do pracy w sieciach niskiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 12, 244-249
- <https://www.ensto.com/pl/dystrybucja-energii/phase-balancer/> (dost. 19.10.2023 r.)
- Maschinenfabrik Reinhausen, On-load tap-changer with motor-drive unit ECOTAP @ VPD @ III 30D-24 / MD&C, Operating Instructions, 8209941/00 EN
- <https://euniversal.eu/poland/> (dost. 19.10.2023 r.)
- Babś A., Kajda Ł., Tarasiuk M., Matuszewicz M., Nowoczesna stacja energetyczna SN/nn jako narzędzie do świadczenia usług elastyczności, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 3, 28-31
- Babś A., Kajda Ł., Noske S., Matuszewicz M., Voltage regulation in the LV network with variable generation based on online measurements from smart meters with the use of the on-load tap changer, *27th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2023*, Paper No 880, Rome, 12-15 June 2023
- Kajda Ł., Matuszewicz M., FlexSubStation, Stacja transformatorowa SN/nn zapewniająca monitorowanie i sterowanie siecią nn, odpowiedź na nowe wyzwania wynikające z transformacji rynku energii, *III Konferencja Linie i stacje elektroenergetyczne, PTPIREE*, 5-6 października 2022 r., Wisła
- Pawlicki B., Pizzutto F., Latosiński M., Kluszczyński K., Smejda K., Rozwój sieci z wykorzystaniem transformatorów SN/nn wyposażonych w podobciążeniowe przełączniki zaczepek z automatyką ARN, *Wiadomości Elektrotechniczne*, LXXXVIII (2020), nr 1, 25-29
- Janiga K., Overvoltage protection of PV microinstallations – regulatory requirements and simulation model, *IAPGOŚ*, (2021) nr 2, 40-43
- PN-EN 50065-1 Transmisja sygnałów elektrycznych niskiego napięcia w zakresie częstotliwości od 3 kHz do 148,5 kHz. Część 1: Wymagania ogólne, zakresy częstotliwości i zaburzenia elektromagnetyczne