

Analiza poboru mocy biernej pojemnościowej na przykładzie budynku usługowego – studium przypadku

Analysis of capacitive reactive power consumption on the example of a service building – a case study

Streszczenie: W pracy przedstawiono problematykę związaną z jakością energii elektrycznej z szczególnym naciskiem na gospodarkę mocą bierną. Zaprezentowano przebiegi parametrów sieciowych dla obiektu pomiarowego w którym występowały problemy jakościowe z pobieraną energią elektryczną. Przeprowadzono analizę oraz dobór sposobu kompensacji mocy biernej z dostępnych na rynku rozwiązań.

Abstract: The paper shows the issues related to the electric power quality with particular focus on reactive power management. The waveforms of grid parameters were presented for the measurement object with power quality issues. Article presents analysis and selection of reactive power compensation methods from commercially available solutions.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, moc biernej pojemnościowa, kompensacja SVG.

Keywords: power quality, capacitive reactive power, SVG compensation.

Wstęp

Zagadnienia związane z jakością energii elektrycznej od kilkudziesięciu lat stały się jednym z najważniejszych zagadnień elektrotechniki. Nowoczesne układy energoelektroniczne oraz ciągle zwiększające się zapotrzebowanie na energię elektryczną w połączeniu z rozproszonymi odnawialnymi źródłami energii stają się nie lada wyzwaniem dla całego systemu dystrybucji i wytwarzania energii elektrycznej pod względem zachowania stabilności działania systemu zasilającego [1].

Ciągle brakuje spójnej definicji terminu jakości energii elektrycznej [2, 3], jednak w uproszczeniu jakość energii elektrycznej powinna być rozumiana jako zbiór mierzalnych parametrów przebiegu napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia odbiorcy, z określeniem dopuszczalnych czasów trwania przerw w zasilaniu oraz częstotliwości występowania tych przerw.

Zagadnienie dotrzymywania jakości energii elektrycznej nie jest narzucone tylko na wytwórcę czy dystrybutora energii elektrycznej, ale dotyczy również odbiorcy końcowego. Ustawodawca w rozporządzeniu Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [4] w art. 45 pkt. 9. narzucił obowiązek dotrzymywania parametrów zasilania na dostawcę energii pod warunkiem zachowania odpowiedniej jakości odbiorów u jej odbiorcy:

- 1) użytkownik systemu pobiera z sieci lub wprowadza do sieci moc czynną równą mocy umownej lub mniejszą,
- 2) moc bierna pobierana z sieci lub wprowadzana do sieci przez użytkownika systemu nie przekracza granicznych wartości określonych w umowie o świadczenie usług przesyłania lub dystrybucji energii elektrycznej albo w umowie kompleksowej,
- 3) użytkownik systemu wypełnia zobowiązania dotyczące regulacji mocy biernej i napięcia określone w umowie o świadczenie usług przesyłania lub dystrybucji energii elektrycznej albo w umowie kompleksowej.

Narzucone w ten sposób zobowiązania na odbiorcę energii elektrycznej są monitorowane przez dystrybutora oraz egzekwowane w postaci dodatkowych opłat. Aby uniknąć kar związanych brakiem dotrzymywania wyszczególnionych parametrów należy przeprowadzić pomiary z użyciem analizatora jakości energii elektrycznej

które to umożliwią identyfikację problemów oraz pozwolą na dobór odpowiedniego rozwiązania.

Prawo energetyczne i jego nowelizacje w kontekście mocy biernej

Ogłoszone 15 marca 2019 roku rozporządzenie Ministra Energii w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną [5] w art. 45 definiuje szczegółowe zasady związane z opłatami za ponad umowny pobór mocy biernej.

Jednym z najważniejszych zapisów jest definicja ponad umownego poboru mocy biernej.

Ustawodawca ustala ze rozliczenia podlegają pobory o:

- 1) współczynniku mocy wyższemu od umownego współczynnika i stanowiącą nadwyżkę energii biernej ponad ilość odpowiadającą wartości współczynnika lub $tg\phi_0$,
- 2) indukcyjnym współczynniku mocy biernej przy braku poboru mocy czynnej lub
- 3) pojemnościowym współczynniku mocy biernej zarówno przy poborze energii elektrycznej czynnej jak i przy braku takiego poboru.

Uaktualniona w ten sposób definicja poboru mocy biernej została uzupełniona o przypadki przy braku poboru mocy czynnej, oznaczającej bezpośrednio produkcję mocy czynnej i oddawanie jej do sieci. Aby sprostać wymaganiom instalacji z rozproszonymi instalacjami prosumenckimi w nowoczesnych licznikach energii rozpoczęto zliczanie mocy biernej w sposób czterokwadrantowy.

Bardzo ważnym zapisem jest definicja odbiorców zobowiązanych do rozliczeń za ponad umowny pobór mocy biernej, która umożliwia jej naliczanie dla odbiorców przyłączonych z sieci o napięciu średnim, wysokim i najwyższym. Zapis umożliwia również rozliczanie w uzasadnionych przypadkach odbiorców podłączonych z sieci niskiego napięcia, jeśli użytkują oni odbiorniki o charakterze indukcyjnym, jeżeli zostało to zapisane w umowie o świadczenie usług dystrybucyjnych. Brzmienie art. 45.2 zostało zmienione w rozporządzeniu Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 13 listopada 2020 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną [6]. Z wymienionego punktu usunięto człon dotyczący indukcyjnego charakteru pobieranej mocy biernej. Oznacza to, że każdy z podłączonych odbiorców do sieci niskiego napięcia może

zostać rozliczany za ponad umowny pobór mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej.

Kolejnym zapisem art. 45 jest punkt 3 określający opłaty wynikające z rozliczeń za pobór mocy biernej. W pierwotnej wersji rozporządzenia ustawodawca ustalił, że w okresie rozliczeniowym ponad umowny pobór energii biernej określany jest jako nadwyżka tej energii ponad odpowiadającą wartość współczynnika $tg\varphi_0$, zmierzona w strefach poboru energii bądź całodobowo. Przedstawiony zapis został skonstruowany niefortunnie, nie wynika z niego że każdy charakter mocy biernej zostaje rozliczony na podstawie przekroczenia $tg\varphi_0$ który domyślnie zdefiniowany jest w stosunku do mocy biernej indukcyjnej i z reguły wynosi $tg\varphi_0 = 0,4$. Przedstawiony punkt został również zmieniony w rozporządzeniu zmieniającym [7]. Zdefiniowano w nim że:

- 1) opłacie podlega ponad umowny pobór energii biernej określony jako nadwyżka tej energii ponad ilość odpowiadającą wartości współczynnika $tg\varphi_0$, gdy $tg\varphi > tg\varphi_0$, oraz
- 2) ponad umowne wprowadzanie energii biernej do sieci określone jako nadwyżka tej energii ponad ilość odpowiadającą wartości współczynnika $tg\varphi = 0$.

W zmienionym tekście rozporządzenia uwagę należy skupić na słowach pobór oraz wprowadzanie energii biernej. Jako pobór rozumiany jest pobór energii biernej indukcyjnej, natomiast wprowadzanie jako pobór energii biernej pojemnościowej. Finalnie zmiany wprowadzone w rozporządzeniu całkowicie wykluczają możliwość nieodpłatnego poboru mocy biernej pojemnościowej, która w uzasadnionych przypadkach może zostać naliczana również na odbiorców indywidualnych zasilanych z sieci niskiego napięcia.

Opłaty za moc bierną

Podstawą prawną do naliczania dodatkowych opłat za ponad umowny pobór energii biernej jest ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne [8] oraz jej nowelizacja z dnia 29 listopada 2022 r. w sprawie sposobu kształtowania i kalkulacji taryf oraz sposobu rozliczeń w obrocie energią elektryczną [3].

Określone w powyższych aktach prawnych opłaty wyznaczane są za pomocą wzoru (1) dla mocy biernej indukcyjnej:

$$(1) Q_{BL} = k \cdot C_{rk} \cdot \left(\sqrt{\frac{1+tg^2\varphi}{1+tg^2\varphi_0}} - 1 \right) \cdot A,$$

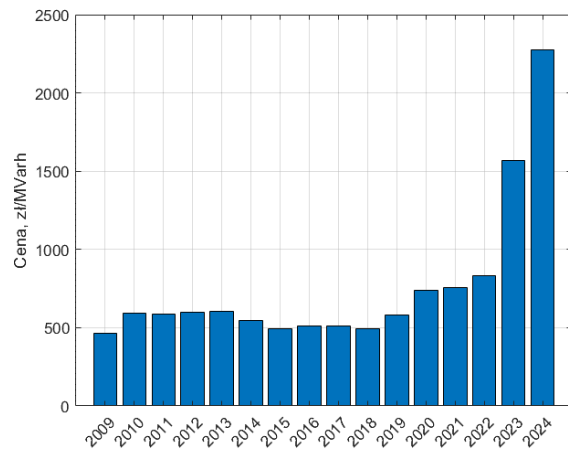
oraz wzoru (2) dla mocy biernej pojemnościowej:

$$(2) Q_{BC} = k \cdot C_{rk} \cdot B,$$

gdzie: Q_{BL} – opłata za ponad umowny pobór mocy biernej indukcyjnej w zł, k – współczynnik krotności ceny dla danej taryfy przyłączeniowej, C_{rk} – cena energii elektrycznej w zł/MWh, A – ilość pobranej energii czynnej w MWh, B – ilość energii biernej pojemnościowej oraz indukcyjnej przy jednoczesnym braku poboru energii czynnej, w MVarh.

Zgodnie z ustawą obowiązującą w danym roku cenę energii elektrycznej ustala Prezes Urzędu Regulacji Energetyki (URE) na podstawie średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym w roku poprzednim. Oficjalne dane publikowane są na stronie internetowej URE [9] do końca marca każdego roku kalendarzowego.

Na podstawie archiwalnych cen ustalonych przez URE oraz współczynnika krotności ceny dla odbiorców zasilanych z sieci niskiego napięcia $k=3$ wyznaczono historyczne oraz aktualną cenę opłat za ponad umowny pobór mocy biernej w danym roku kalendarzowym. Obliczone wartości przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zmienność jednostkowej ceny opłat za ponad umowny pobór mocy biernej w latach 2009-2024 [9]

Z przedstawionego na rysunku 1 zestawienia wynika że w latach 2009-2019 ceny opłat za ponad umowny pobór mocy biernej wahały się w granicach od 500 do 600 zł/MVarh. W latach 2019-2022 widać kilkunastoprocentowy wzrost do około 800 zł/MVarh, jednak ceny z roku 2023 i 2024 notują prawie 50% wzrost rok do roku i wynoszą odpowiednio 1550 zł/MVarh w 2023 r. oraz 2260 zł w 2024 r. W kolejnym rozdziale zostanie przedstawiony rzeczywisty obiekt badań oraz opłaty ponoszone przez właściciela w związku z ponad umownym poborem mocy biernej.

Badany budynek usługowy

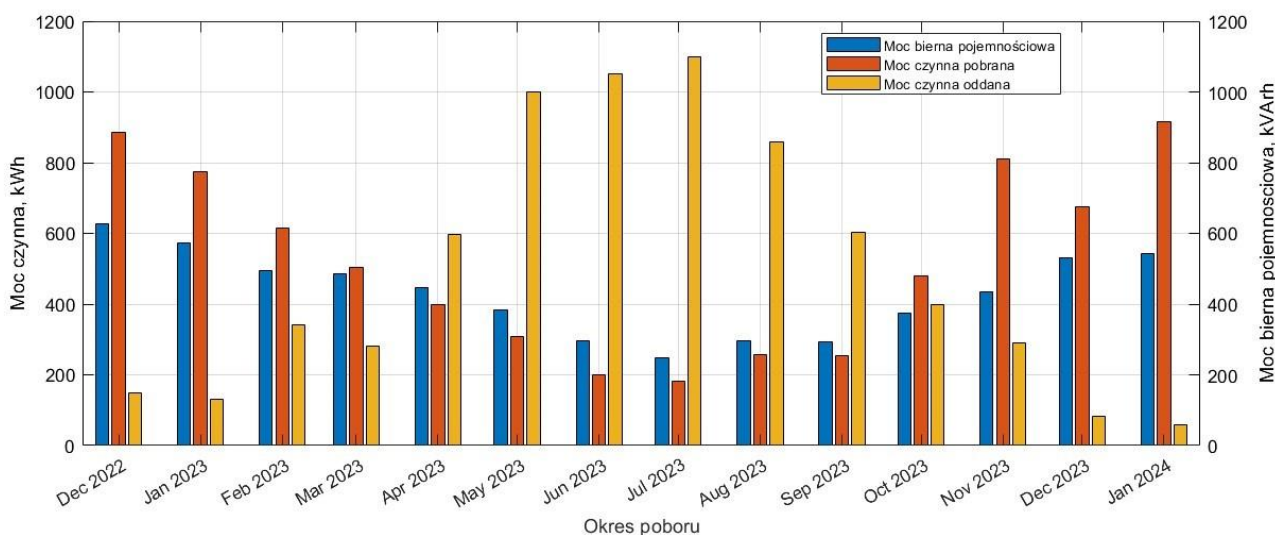
Badany obiekt o powierzchni 300 m² jest powierzchnią usługową w której znajduje się podstawowa infrastruktura biurowa i magazynowa. Pośród odbiorów energii elektrycznej należy wyszczególnić:

- obwody świetlne o łącznej mocy 400W,
- wentylację mechaniczną o mocy 500W,
- klimatyzację o mocy 6000W,
- zasilanie awaryjne UPS o mocy 1500VA,
- stacje robocze PC o mocy łącznej 1000W.

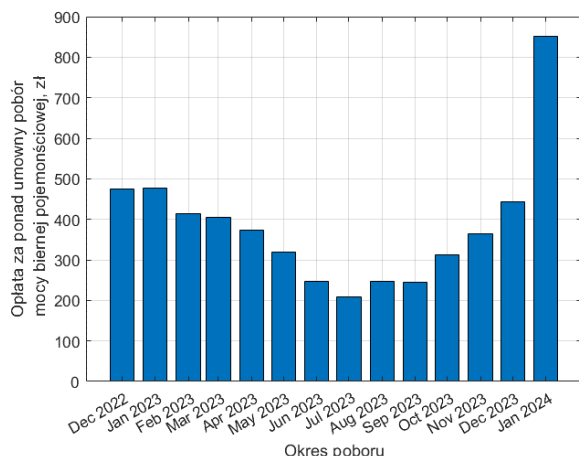
Budynek posiada również instalację fotowoltaiczną o mocy 10 kWp bez dodatkowego banku energii.

Przed rozpoczęciem pomiarów przeprowadzono analizę faktur za energię elektryczną celem wyznaczenia sezonowości poboru energii czynnej i biernej. Dane odczytane z dokumentów rozliczeniowych zaprezentowano na rysunku 2. Dokonano analizy zamówionej mocy przyłączeniowej oraz naliczonych dodatkowych opłat związanych z ponad umownym poborem energii biernej oraz przekroczeniami mocy umownej.

Na podstawie analizy faktur stwierdzono brak naliczeń dodatkowych opłat za pobór mocy biernej indukcyjnej, dodatkowo zauważono, że na wszystkich fakturach nie zarejestrowano ani jednej kVarh mocy biernej indukcyjnej, co świadczy o dominującej ilości odbiorników o charakterze pojemnościowym w badanej sieci. Analizowany miesięczny rozkład mocy czynnej pobranej i oddanej do sieci jest charakterystyczny dla prosumentów z instalacją fotowoltaiczną. Obserwujemy znaczne ilości mocy czynnej oddanej do sieci w okresach letnich, sięgających 1050 kWh miesięcznie oraz niewielkie nadwyżki mocy oddanej w szczytowych porach dnia okresów zimowych.



Rys. 2. Analiza zmienności obciążenia mocą czynną i bierną pojemnościową na przestrzeni 14 miesięcy



Rys. 3. Wartości opłat ponoszonych przez odbiorcę z ponad umowny pobór mocy biernej pojemnościowej na przestrzeni 2022 - 2024 roku.

Zaobserwować można również sezonowość w poborze mocy biernej pojemnościowej. Zmienia się ona od 620 kVAh w okresie zimowym, do ok 240 kVAh w okresie letnim, co może być związane z dłuższym czasem użytkowania obwodów świetlnych zimą.

Naliczone dodatkowe opłaty z tytułu nie dotrzymania ograniczeń w poborze mocy biernej pojemnościowej w badanym okresie przełożyło się na wymierne obciążenia finansowe przedstawione na rysunku 3. Dla badanego okresu 14 miesięcy suma zobowiązań wynikająca z uchybień wyniosła 5385 zł. Przy uwzględnieniu trendu zmian cen energii elektrycznej w roku 2024 szacowany koszt oscyluje w okolicach 11 tys. zł. Po wstępnej analizie problemu przeprowadzono pomiary jakości energii elektrycznej na podstawie których dobrano układ kompensujący negatywne parametry jakości energii.

Pomiary i analiza jakości energii elektrycznej

Pomiary jakości energii elektrycznej przeprowadzono na badanym obiekcie za pomocą analizatora firmy Sonel PQM-710 z wykorzystaniem przekładników prądowych C-7A o zakresie pomiarowym do 100 A. Urządzenie pomiarowe zostało wykonane w klasie pomiarowej A i umożliwia rejestrację wszystkich parametrów jakości energii elektrycznej zgodnie z obowiązującymi normami. Pomiary

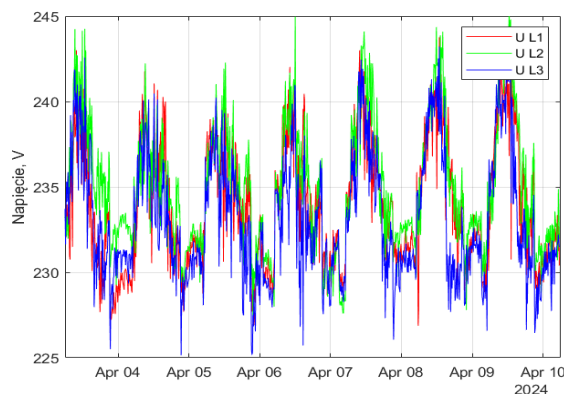
probowano na badanym obiekcie przez 7 kolejnych dni celem rejestracji tygodniowego trendu parametrów jakościowych z szczególnym uwzględnieniem dni wolnych od pracy przedsiębiorstwa.

Pierwszym krokiem w analizie parametrów jakościowych energii elektrycznej jest sprawdzenie zarejestrowanych zdarzeń w przebiegu napięcia zasilania. Szczególną uwagę poświęca się zarejestrowanym spadkom i wzrostom napięcia ponad wartości określone w normie [10], krótkim przepięciom oraz zapadom i krótkotrwałym zanikom. Na podstawie badanego obiektu nie zarejestrowano żadnego z ww. zjawisk. Kolejną analizę poddano poziomemu napięciu fazowym oraz rozkład poszczególnych harmonicznych napięcia których wartości zaprezentowano na rysunku 4 oraz 5.

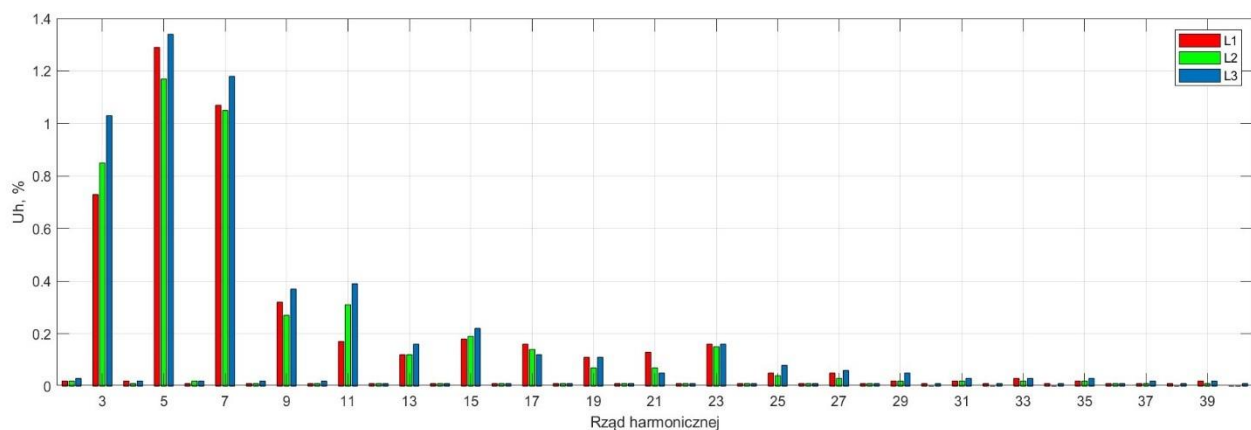
Zarejestrowane wartości są zawierają się w dopuszczalnych limitach określanych przez normę [10].

W kolejnym etapie analizie poddawane są przebiegi krótkookresowych (PST) i długookresowych (PLT) współczynników migotania światła. Zarejestrowane przebiegi współczynników PST i PLT przedstawiono na rysunku 6.

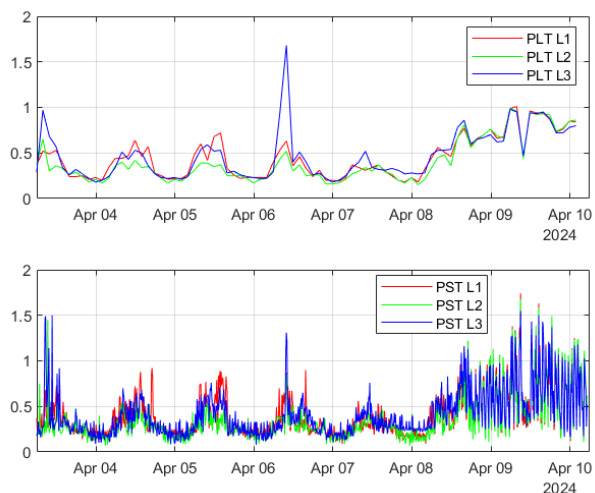
Zgodnie z zaleceniami normy limity określone są dla 95% procent czasu trwania pomiarów i wynoszą odpowiednio $PLT_{max} = 0,65$ i $PST_{max} = 1$ [10]. Zarejestrowane wartości przekraczają określone limity.



Rys. 4. Przebieg napięcia zasilania uśrednianie 10 minutowe.

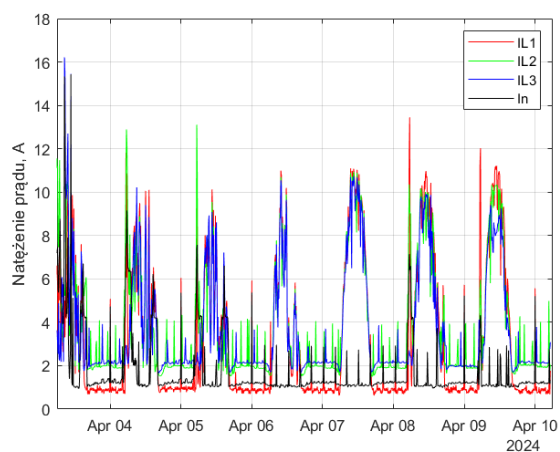


Rys. 5. Wyższe harmoniczne napięć fazowych



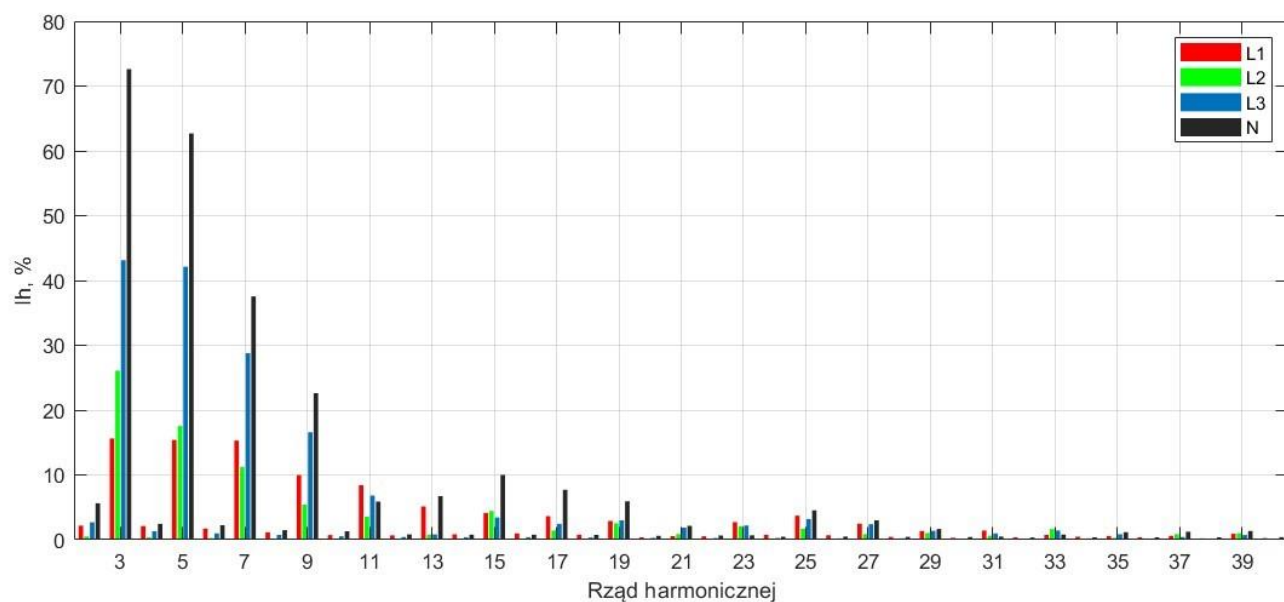
Rys. 6. Krótko i długookresowe współczynniki migotania światła każdej z faz PST i PLT

Przebiegi wartości skutecznych prądów fazowych oraz rozkład harmonicznych, zaprezentowanych na rysunkach 7 i 8, wskazują na obecność odbiorników nieliniowych. Dodatkowo zawartość wyższych harmonicznych w przewodzie neutralnym związana jest z występowaniem znacznej ilości odbiorników jednofazowych.

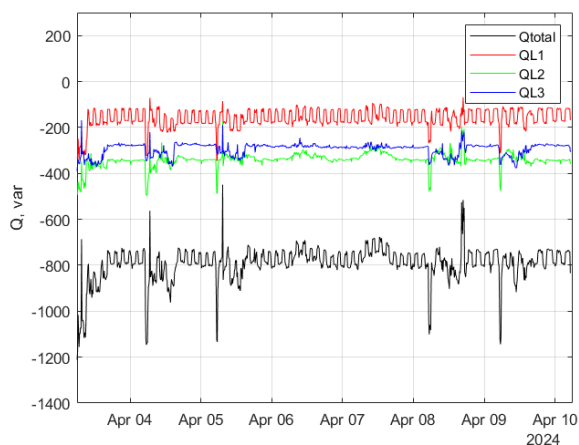


Rys. 7. Wartości skuteczne prądów fazowych oraz prądu przewodu neutralnego

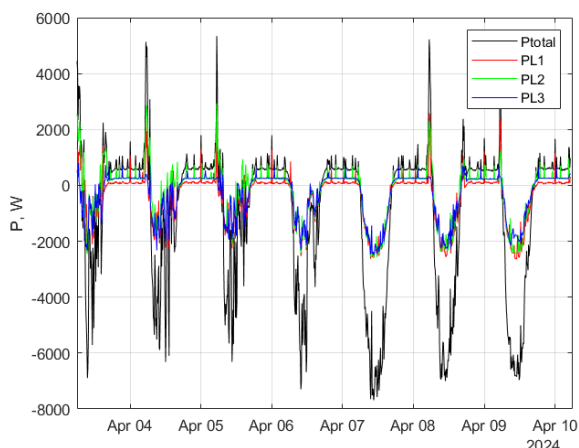
Zaprezentowany na rys. 10 przebieg mocy czynnej w badanym okresie jest charakterystyczny dla odbiorców wyposażonych w instalację prosumencką. Możemy zaobserwować ujemne wartości mocy świadczące o oddawaniu energii do sieci zasilającej. Jedynie w okresach porannych i nocnych występuje pobór mocy czynnej. Przebieg mocy biernej przedstawiony na rys. 9 w całości trwania pomiarów ma charakter pojemnościowy.



Rys. 8. Wyższe harmoniczne prądów fazowych i przewodu neutralnego



Rys. 9. Przebieg mocy bierniej



Rys. 10. Przebieg mocy czynnej

Posiada podwyższone wartości na fazach L2 i L3 w stosunku do fazy L1. Średnia wartość mocy bierniej pojemnościowej w badanym okresie wynosi $Q_c = 800 \text{ VAR}$, natomiast maksymalna $Q_{cmax} = 1,2 \text{ kVAR}$.

Poprawa jakości energii elektrycznej

Zarejestrowane parametry jakości energii elektrycznej na badanym obiekcie są zgodne z przyjętymi normami, z wyjątkiem chwilowych przekroczeń współczynników migotania światła. Z przeprowadzonego wywiadu osoby przebywające w pomieszczeniach nie skarżyły się na oddziaływanie flickera, a same odczyty były nieznacznie podwyższone. Celem uniknięcia dodatkowych opłat za dystrybucję energii elektrycznej należy jednak poprawić gospodarkę mocą bierną poprzez zastosowanie układu kompensującego o charakterze indukcyjnym.

Aktualnie na rynku najbardziej popularne są 3 typy rozwiązań:

- prowadzenie kompensacji przez stałą nastawę w falowniku fotowoltaicznym,
- bocznikowe dławiki kompensacyjne,
- aktywne kompensatory dynamiczne SVG (ang. Static Var Generator)

Pierwsze rozwiązanie z wykorzystaniem funkcji generacji stałej mocy bierniej do układu przez falownik fotowoltaiczny na badanym obiekcie z pewnością jest najtańsze z punktu widzenia inwestycji, niesie jednak z sobą duże ograniczenia. Przy braku produkcji falownik nie jest w stanie prowadzić kompensacji, co prowadzi przez to w okresie nocnym że moc bierna pojemnościowa nadal będzie naliczana przez licznik energii elektrycznej.

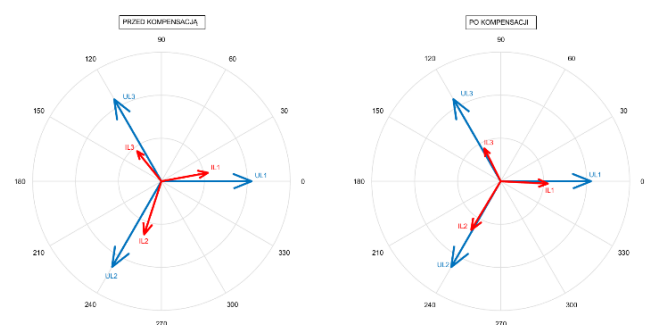
Rozwiązaniem problemu mógłby być dodatkowy moduł z bankiem energii jednak wymaga on znacznych nakładów finansowych oraz wymiany falownika na model umożliwiający kompensację mocy bierniej [11].

Bocznikowe dławiki kompensacyjne działają na zasadzie stopniowego włączenia do sieci dławików wprowadzających moc bierną indukcyjną. Sterownik poprzez styczniki kolejno włącza do sieci stopnie utrzymując poziom mocy na zadanym poziomie współczynnika mocy. Zasada działania polega na przejściu na charakter indukcyjny w taki sposób aby utrzymać współczynnik $\text{tg}\varphi$ poniżej wartości umownej $\text{tg}\varphi_0 < 0,4$. Wadą tego rozwiązania są duże straty mocy czynnej w rdzeniu dławika oraz nadmierne wydzielanie się ciepła. Dodatkowym minusem jest skokowa zmiana wartości generowanej mocy bierniej odpowiadającej wybranej wartości mocy bierniej generowanej przez poszczególne stopnie [12].

Zasada działania kompensatorów SVG opiera się na pomiarze prądów obciążenia oraz wstrzykiwaniu do sieci prądu kompensującego mającego na celu spełnienie wymagań założonego współczynnika mocy [13, 14].

Sterowanie generowanym prądem kompensującym odbywa się za pomocą sterowanego przekształtnika tranzystorowego umożliwiającego bardzo krótki czas reakcji na zmianę obciążenia sieci wynoszącego do $t = 10 \text{ ms}$.

Z dostępnych na rynku rozwiązań wybrano kompensator dynamiczny SVG o mocy 10 kVAR którego moc określono na podstawie przeprowadzonych pomiarów z uwzględnieniem archiwalnych danych świadczących o sezonowej zmienności zapotrzebowania na moc bierną. Zachowano również duży zapas mocy ze względu na planowaną rozbudowę systemu zasilania w budynku o pompę ciepła.



Rys. 11. Wykresy wskazowe prądu i napięcia przed i po kompensacji

Przeprowadzona modernizacja umożliwiła całkowitą niwelację mocy bierniej pojemnościowej. Celem kompensacji było utrzymanie współczynnika mocy na poziomie $\cos \varphi = 0,99$ co prowadzi do nieznacznego poboru mocy bierniej indukcyjnej pozwalając uniknąć związanych z nią opłat co zaprezentowano na rysunku 11. Szacowany zwrot kosztów inwestycji nastąpi po ok. 14 miesiącach.

Wnioski

W obecnych czasach zagadnienie jakości energii elektrycznej zaczyna coraz bardziej przybierać na znaczeniu również dla odbiorców zasilanych z sieci niskiego napięcia. Ogromny wzrost rozproszonych źródeł energii, których całkowita moc na przestrzeni ostatnich 6 lat wzrosła z 300 MW aż do 18 GW [15], zawirowania związane z polityką klimatyczną oraz zmiany krajowego prawa dotyczącego gospodarowania mocą bierną w systemie elektroenergetycznym zmuszają nawet małych odbiorców do podjęcia działań celem unikania dodatkowych opłat

związanych z ponad umownym poborem mocy biernej. Zaprezentowana analiza może posłużyć innym małym przedsiębiorcom w poszukiwaniu odpowiedniego rozwiązania poprawy charakteru dołączonych do sieci odbiorników.

Autorzy: dr hab. inż. Tomasz Trawiński, tomasz.trawinski@polsl.pl,
mgr inż. Damian Błaszczok, damian.blaszczok@polsl.pl,
Politechnika Śląska, Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10A,
44-100 Gliwice

LITERATURA

- [1] Kredenc B., Sikorski T.: Wybrane zagadnienia współczesnej oceny jakości energii elektrycznej. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr. 70, 2014, s375-389.
- [2] Cieślak S.: Jakość energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr. 50, 2016, s11-14.
- [3] Hanzelka Z.: Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Wydawnictwa AGH, Kraków 2003.
- [4] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Warszawa, 2023.
- [5] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 6 marca 2019 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną, Warszawa, 2019
- [6] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 13 listopada 2020 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną. Warszawa, 2020.
- [7] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 29 listopada 2022 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną. Warszawa, 2022.
- [8] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. - Prawo energetyczne. Warszawa, 1997.
- [9] Urząd Regulacji Energetyki: <https://www.ure.gov.pl>
- [10] PN-EN 50160, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
- [11] Huawei: <https://solar.huawei.com/pl/news-room/pl/2022/new-20220831-1>
- [12] Trawiński T. i in., „Analiza zużycia energii elektrycznej wybranych przedsiębiorstw w kontekście nowych metod kompensacji mocy biernej”, Prace Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka, t. R. 61, Art. nr 3, 2015.
- [13] Ruisheng L., Wong P., Wang K., Bin L., Fangfang Y.: Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020
- [14] SMOne: <https://smone.pl/produkty/kategoria/kompensatory-svg->
- [15] Rynek Elektryczny: <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-fotowoltaiki-w-polsce/>