



Poradnik

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ



Kompensacja mocy
biernej na farmach
wiatrowych oraz
fotowoltaicznych

Poprawa jakości
energii i eliminacja
zaburzeń elektro-
energetycznych

Współpraca
filtra aktywnego
z instalacją
fotowoltaiczną

Redakcja

Adres redakcji
ul. Karczevska 18, 04-112 Warszawa
tel. 22 810 65 61
faks 22 810 27 42
redakcja@elektro.info.pl
www.elektro.info.pl



Reklama: Karolina Rosa, krosa@medium.media.pl
Hanna Witkowska, hwitkowska@medium.media.pl

Redakcja: Anna Kuziemska, akuziemska@elektro.info.pl



Grupa MEDIUM
Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp.K.
ul. Karczevska 18, 04-112 Warszawa
tel. 22 810 21 24, faks 22 810 27 42
ISBN 978-83-64094-10-1

Spis treści

- Współpraca filtra aktywnego z instalacją fotowoltaiczną w zakresie kompensacji mocy biernej 4
- Ocena jakości kompensacji mocy biernej z wykorzystaniem statycznego generatora SVG w warunkach obciążenia trójfazowego 8
- Kompensacja mocy biernej na farmach wiatrowych oraz fotowoltaicznych 12
- Kompensacja mocy biernej w układach PV współpracujących z instalacją przemysłową 16
- Efektywność energetyczna przemysłu i przedsiębiorstw – praktyczne aspekty pomiaru i zarządzania energią 20
- Jakość kompensacji mocy biernej w aspekcie utrzymania wartości współczynnika mocy 24
- Zagrożenia pożarowe stwarzane przez układy kompensacji mocy biernej (część 1.). 28
- Metody neutralizacji zagrożeń pożarowych stwarzane przez układy kompensacji mocy biernej (część 2.). 32
- UPS-y kompensacyjne. Nowa generacja profesjonalnych urządzeń zasilania bezprzerwowego produkcji Benning 34
- Optymalizacja kosztów energii poprzez zarządzanie mocą bierną i współczynnikiem mocy – zagadnienia wybrane 36
- Jakość kompensacji mocy biernej na podstawie działania filtra aktywnego AHF 38
- Kompensacja mocy biernej przy zasilaniu budynków z sieci elektroenergetycznej oraz zasilaniu z instalacji PV. 42
- Jakość energii elektrycznej – analiza oraz poprawa poprzez zastosowanie aktywnych filtrów wyższych harmonicznych. 46
- Poprawa jakości energii i eliminacja zaburzeń elektroenergetycznych. 48
- Kompensacja mocy biernej w obwodach z asymetrią obciążenia 50
- Efektywność energetyczna przemysłu i przedsiębiorstw 54
- Obniżenie rachunków za energię elektryczną poprzez analizę parametrów sieci analizatorem jakości zasilania Sonel PQM 56
- Kompensacja mocy biernej dla odbiorów o szybkich i częstych zmianach jej zapotrzebowania 60
- Cel stosowania przekładników prądowych oraz sposoby kompensacji mocy biernej – zagadnienia wybrane 64
- Katalog firm 68

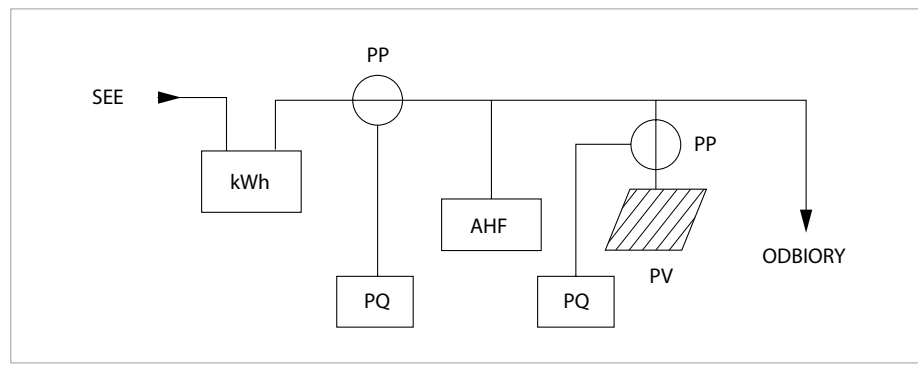
Partnerzy publikacji



Współpraca filtra aktywnego z instalacją fotowoltaiczną w zakresie kompensacji mocy biernej

Wymagania w zakresie kompensacji mocy biernej przy współpracy z instalacją fotowoltaiczną

Rosnące w ostatnich latach koszty za energię elektryczną skłaniają przedsiębiorstwa prywatne oraz jednostki publiczne do szukania w tym zakresie oszczędności. Jednym z możliwych rozwiązań jest instalacja źródeł fotowoltaicznych w celu ograniczenia zapotrzebowania na energię elektryczną kupowaną z sieci. Rozwiązanie to wpływa jednak na bilans mocy w obiekcie, gdzie następuje ograniczenie poboru energii czynnej przy niezmiennym zapotrzebowaniu na energię bierną. Zgodnie z wymaganiami rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie sposobu kształtowania i kalkulacji taryf oraz sposobu rozliczeń w obrocie energią elektryczną [1], jako jeden z możliwych przypadków, przez ponadumowny pobór energii biernej przez odbiorcę rozumie się ilość energii biernej odpowiadającą współczynnikowi mocy $\cos \varphi$ wyższemu od umownego współczynnika $\cos \varphi_0$ (niedokom-



Rys. 1. Schemat ideowy instalacji w obiekcie biurowym, gdzie: SEE – system elektroenergetyczny, kWh – licznik energii elektrycznej, PP – przełącznik prądowy, PQ – analizator jakości energii elektrycznej, AHF – filtr aktywny wyższych harmonicznych, PV – instalacja fotowoltaiczna rys. A. Książkiewicz

pensowanie) i stanowiącą nadwyżkę energii biernej indukcyjnej ponad ilość odpowiadającą wartości współczynnika $\cos \varphi_0$. Wartość współczynnika mocy $\cos \varphi_0$ określa się w warunkach przyłączenia lub w umowie o świadczenie usług przesyłania lub dystrybucji energii elektrycznej, albo w umowie kompleksowej. Wartość współczynnika mocy przyjmuje się w wysokości $\cos \varphi_0 = 0,4$ i nie może być niższa od wartości 0,2. Opłatę za nadwyżkę energii biernej pobranej ponad ilość wynikającą ze współ-

czynnika $\cos \varphi_0$ w okresie rozliczeniowym, całodobowo lub dla stref czasowych, w których jest prowadzona kontrola poboru tej energii, oblicza się według wzoru (1):

$$Q_b = k \times C_{rk} \times \left(\sqrt{\frac{1 + \tan^2 \varphi}{1 + \tan^2 \varphi_0}} \right) \times A \quad (1)$$

gdzie:

O_b – opłata za nadwyżkę energii biernej, w [zł],
 k – ustalona w taryfie krotność ceny C_{rk} ,
 C_{rk} – cena energii elektrycznej, obowiązująca w dniu zatwierdzenia taryfy, w [zł/MWh] lub [zł/kWh],

$\cos \varphi$ – współczynnik mocy wynikający z pobranej energii biernej,
 $\cos \varphi_0$ – umowny współczynnik mocy,

STRESZCZENIE

Instalacja fotowoltaiczna ma na celu zaspokojenie, przynajmniej częściowo, zapotrzebowania odbiorcy na energię czynną. Zmiana tego zapotrzebowania wpływa na bilans mocy i wypadkową wartość współczynnika mocy. Może też prowadzić do obniżenia wartości tego współczynnika i naliczenia dodatkowych opłat z tytułu ponadumownego poboru energii biernej. W artykule przedstawiono działanie filtra aktywnego, którego jednym z zadań była kompensacja mocy biernej w obiekcie z zainstalowaną instalacją PV. Wykazano prawidłowe działanie tego układu i utrzymanie współczynnika mocy na wymaganym poziomie. **Słowa kluczowe:** filtr aktywny, AHF, instalacja fotowoltaiczna, jakość energii.

A – energia czynna pobrana całodobowo lub w strefie czasowej, w której jest dokonywana kontrola poboru energii biernej, w [MWh] lub w [kWh].

Ponieważ wartość współczynnika $\cos \varphi$ odnosi się do wartości energii biernej i czynnej, przy zmianie zapotrzebowania na energię czynną wartość tego współczynnika będzie wzrastać. Tym samym może dojść do sytuacji, że po zamontowaniu i uruchomieniu instalacji fotowoltaicznej nastąpi ograniczenie opłat z tytułu zakupu energii czynnej, ale pojawią się opłaty za ponadumowny pobór energii biernej indukcyjnej. Aby zapewnić brak tych opłat, należy zastosować kompensację mocy biernej.

Opis instalacji elektrycznej obiektu

Przedstawiony zostanie przykład obiektu o charakterze biurowym (rys. 1.), charakteryzujący się mocą zamówioną 62 kW, na dachu którego została zainstalowana instalacja fotowoltaiczna o mocy 50 kWp w układzie wschód-zachód. Dodatkowo zainstalowane są dwa analizatory jakości energii elektrycznej typu PQI-DA Smart firmy A-Eberle (rys. 2.) [2]. Jeden wykonuje pomiar wyłącznie na instalacji fotowoltaicznej (PV), drugi wykonuje pomiar na przyłączy głównym obiektu. Instalacja wyposażona jest w filtr aktywny ASTec AHF o prądzie znamionowym 50 A (rys. 3.). Do zadań filtra należą: kompensacja mocy biernej, redukcja wyższych harmonicznych prądu oraz symetryzacja obciążenia. Niniejszy artykuł opisywać będzie tylko zadanie kompensacji mocy biernej.

Efekty kompensacji mocy biernej w rozpatrywanej instalacji

Ocena efektów kompensacji mocy biernej dokonywana jest na podstawie wartości następujących wielkości elektrycznych:

- » moc czynna pobierana i oddawana do sieci,
- » moc czynna generowana w instalacji fotowoltaicznej,
- » moc bierna pobierana składowej podstawowej harmonicznej 50 Hz z sieci zasilającej,
- » moc bierna składowej podstawowej harmonicznej 50 Hz w instalacji fotowoltaicznej,
- » współczynnik mocy $\cos \varphi$ w sieci zasilającej,
- » współczynnik mocy $\cos \varphi$ w instalacji fotowoltaicznej.

Analiza została dokonana w typowym tygodniu pracy w dniach od 8 do 14 lipca 2024 roku (poniedziałek – niedziela).

W rozpatrywanym przedziale czasu zarejestrowane maksymalne pobory i generacje

	Moc czynna P, w [kW]	Moc bierna Q, w [kVar]
Sieć zasilająca	-29,0/24,9	7,2 (L)
Instalacja fotowoltaiczna	-39,7	-0,22 (C)/0,076 (L)

C – moc bierna o charakterze pojemnościowym
L – moc bierna o charakterze indukcyjnym

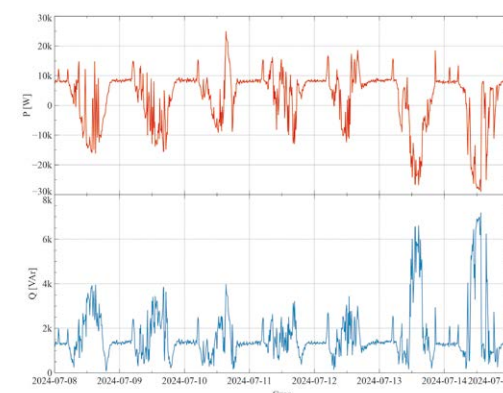
Tab. 1. Wartości maksymalne mocy pobieranej z sieci (wartość z plusem) i generowanej do sieci (wartość z minusem) mocy czynnej oraz wartości mocy biernych indukcyjnej (L) i pojemnościowej (C)

Parametr statystyczny	Wartość
Średnia	0,9600
Mediana	0,9869
Pierwszy kwartyl	0,9710
Trzeci kwartyl	0,9871
Minimum	0,0 057
Maksimum	0,9878

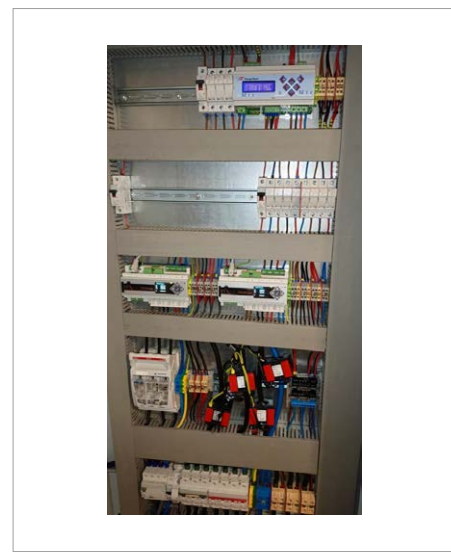
Tab. 2. Wartości wybranych parametrów statystycznych opisujących wartość współczynnika mocy $\cos \varphi$

mocy czynnej i biernej przedstawiono w tabeli 1. Przebieg wartości mocy czynnej pobieranej i generowanej z/do sieci zasilającej oraz mocy biernej przedstawiono na rysunku 4. Przedstawione pomiary wykazują, że w rozpatrywanym przedziale czasu następuje oddawanie mocy czynnej do sieci. Oznacza to, że moc generacji źródła fotowoltaicznego przekracza zapotrzebowanie odbiorów w obiekcie. W godzinach późnopołudniowych, nocnych i wczesnopornych rejestrowany jest pobór mocy czynnej o wartości 8,2 kW. Pobór mocy biernej, dla całego rozpatrywanego przedziału czasu, utrzymywał się w charakterze indukcyjnym.

Generacja mocy czynnej przez instalację fotowoltaiczną (rys. 5.) przypomina krzywą dzwonową produkcji mocy ze źródeł PV. Widoczne są zmiany tej mocy, które najpewniej są związane z chwilowym zachmurzeniem nieba. Szczytowa wartość generacji mocy czynnej w rozpatrywanym czasie wynosiła 39,7 kW. Zauważalny jest zmienny charakter poboru mocy biernej, gdzie dominuje charakter pojemnościowy tej mocy (wartość Q z minusem). Pobór ten związany jest z charakterem pracy inwertera i zauważalny jest dla szeregu urządzeń tego typu. Moc ta osiąga jednak niewielkie wartości, chwilami przekraczając 200 VAr dla wszystkich trzech faz sumarycznie. Na rysunku 6. przedstawiono zestawienie generacji mocy czynnej ze źródła fotowoltaicznego P_{PV} oraz pobór/generację mocy czynnej z sieci zasilającej P. Generacja mocy PV rozpoczyna się już po godzinie piątej rano i trwa do godziny dwudziestej pierwszej. Bilans mocy wskazuje, że oddawanie energii czynnej do sieci rozpoczyna się po godzinie dziewiętej rano i trwa do godziny dziewiętnastej. Wartość współczynnika mocy $\cos \varphi$ dla instalacji fotowoltaicznej nastawiona jest na poziomie 1,00. Rzeczywista wartość tego współczynnika, w relacji do zmian mocy czynnej, przedstawiono na rysunku 7. Podczas normalnej pracy



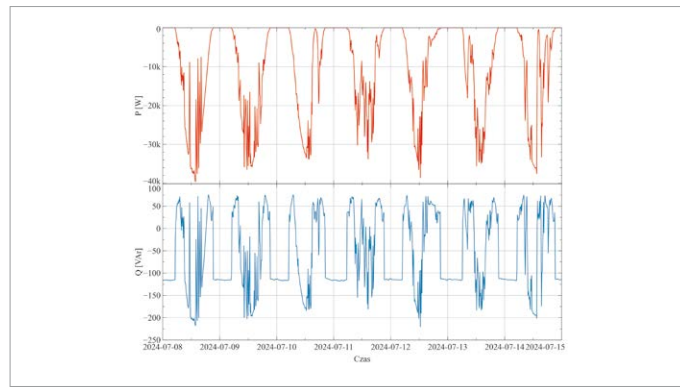
Rys. 4. Wykres zmian poboru mocy czynnej i biernej z systemu zasilania rys. A. Książkiewicz



Rys. 2. Zdjęcie rozdzielni elektrycznej z zainstalowanymi analizatorami jakości energii elektrycznej wraz z innymi aparatami elektrycznymi rys. A. Książkiewicz



Rys. 3. Zdjęcie filtra aktywnego ASTec AHF o prądzie znamionowym 50 A rys. A. Książkiewicz



Rys. 5. Wykres zmian poboru mocy czynnej i biernej ze źródła fotowoltaicznego
rys. A. Książkiewicz

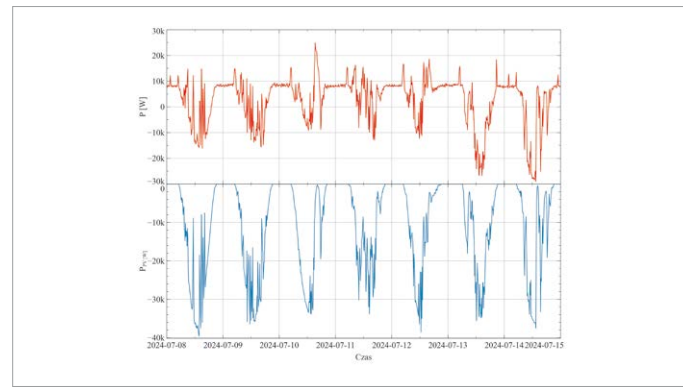
współczynnik $\cos \phi$ osiąga wartość na poziomie 0,999 i wyższą. Przy braku generacji mocy współczynnik osiąga wartość 0,055 przy pojemnościowym charakterze mocy biernej.

Wypadkowa wartość współczynnika mocy $\cos \phi$, obserwowana z punktu widzenia dostawcy energii, wraz z przebiegiem pobieranej i generowanej mocy czynnej, przedstawiona została na **rysunku 8**. Statystyczny opis zmienności tej wartości przedstawiono w **tabeli 2**. Nastawiony parametr na filtrze aktywnym miał wartość 0,980. Można zauważyć, że dla wartości średniej, mediany, a także pierwszego i trzeciego kwartyla współczynnik mocy jest utrzymywany na wymaganym poziomie. Przez cały czas pomiarowy moc bierna ma charakter indukcyjny. Występują krótkotrwałe zmiany współczynnika mocy poniżej nastawionej wartości. Występują one w chwili, gdy moc czynna mieści się w zakresie $-500 \text{ W} < P < 500 \text{ W}$ całkowitej. Najczęściej ma to miejsce przy przejściu mocy czynnej z poboru na generację. Jednocześnie nie następuje zmiana charakteru mocy z biernej indukcyjnej na pojemnościową. Tym samym uzyskuje się gwarancję braku poboru mocy biernej o charakterze pojemnościowym przy poborze i generacji mocy czynnej. Należy zauważyć, że

dla rozpatrywanej instalacji rachunek za energię elektryczną nie zawiera opłat za pobór energii biernej, co również świadczy o prawidłowej pracy filtra aktywnego w zakresie kompensacji mocy biernej.

Podsumowanie

Instalacja źródeł fotowoltaicznych prowadzi do ograniczenia zakupu energii czynnej od dostawcy energii i operatora systemu. Jednocześnie zmianie ulega bilans mocy w punkcie przyłączenia, co może prowadzić do pojawienia się dodatkowych opłat z tytułu ponadumownego poboru energii biernej. Przedstawiona instalacja w obiekcie biurowym została wyposażona w filtr aktywny, którego jednym z zadań była kompensacja mocy biernej. Przedstawione wyniki pomiarów wskazują jednoznacznie, że zastosowane rozwiązanie zapewnia właściwy poziom kompensacji mocy biernej i utrzymanie współczynnika mocy $\cos \phi$ na wymaganym poziomie. Działanie jest prawidłowe zarówno przy poborze, jak i generacji mocy czynnej. Rachunki za energię elektryczną nie zawierają dodatkowych opłat za pobór mocy biernej. Można tym samym stwierdzić, że udało się zapewnić kompensację mocy biernej, poprzez zastosowanie



Rys. 6. Wykres zmian poboru i generacji mocy czynnej z sieci zasilającej (P) ze źródła fotowoltaicznego (P_{pv})
rys. A. Książkiewicz

filtra aktywnego, w instalacji ze źródłami PV i zlikwidować dodatkowe opłaty.

Literatura

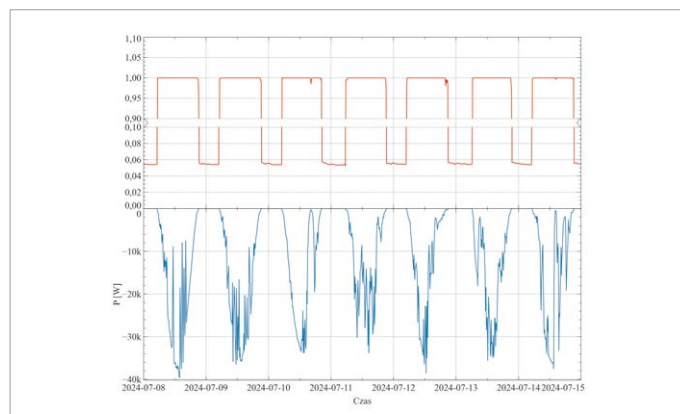
- Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie sposobu kształtowania i kalkulacji taryf oraz sposobu rozliczeń w obrocie energią elektryczną.
- <https://www.a-eberle.de/en/products/power-quality-analyzer-pqi-da-smart/>.

ABSTRACT

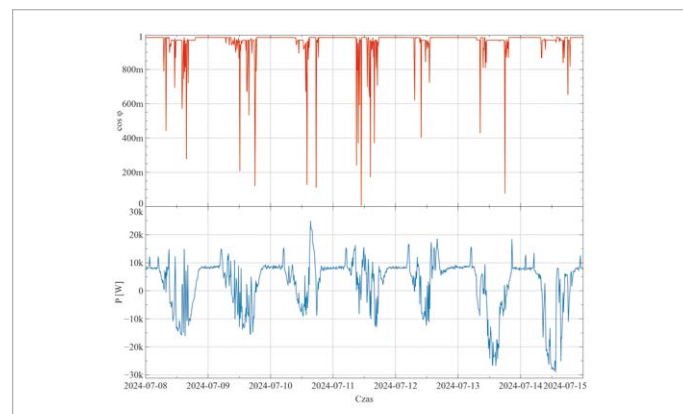
Cooperation of the active filter with the photovoltaic installation in the field of reactive power compensation

A photovoltaic installation is designed to meet, at least in part, the active energy needs of the consumer. A change in this demand affects the power balance and the end value of the power factor. This change can lead to a reduction in the value of this coefficient and additional charges for reactive energy consumption. This paper presents the operation of an active filter, one of whose tasks was to compensate the reactive power, on a facility with a PV installation. The correct operation of this system and the maintenance of the power factor at the required level is demonstrated.

Keywords: active filter, AHF, photovoltaic installation, power quality.



Rys. 7. Wykres zmian poboru mocy czynnej i współczynnika mocy $\cos \phi$ ze źródła fotowoltaicznego
rys. A. Książkiewicz



Rys. 8. Wykres zmian poboru mocy czynnej i współczynnika mocy $\cos \phi$ z systemu zasilania
rys. A. Książkiewicz

FILTR AKTYWNY

ODPOWIEDŹ NA TWOJE PROBLEMY

CZY TWOJA ODPOWIEDŹ BRZMI „TAK”?



Podjezrewasz, że napięcie zasilające w Twojej firmie jest silnie odkształcone?



Obawiasz się, że nie spełniasz norm i przepisów dotyczących jakości energii elektrycznej?



Zaobserwowałeś częste wyłączenia, awarie, nieprawidłowe działanie falowników i innych urządzeń?

ZNAJDZIEMY ROZWIĄZANIE DLA CIEBIE

Jeśli chociaż na jedno pytanie **ODPOWIEDZIAŁEŚ TAK**, mamy rozwiązanie Twoich problemów – filtr aktywny wyższych harmonicznych.

INSTALACJA FILTRA AKTYWNEGO POZWALA NA:



redukcję odkształceń napięcia zasilającego do dopuszczalnego poziomu



zmniejszenie obciążenia transformatorów rozdzielczych i strat energii



zwiększenie niezawodności i wydajności pracy urządzeń



kompensację mocy biernej



Ocena jakości kompensacji mocy biernej z wykorzystaniem statycznego generatora SVG w warunkach obciążenia trójfazowego

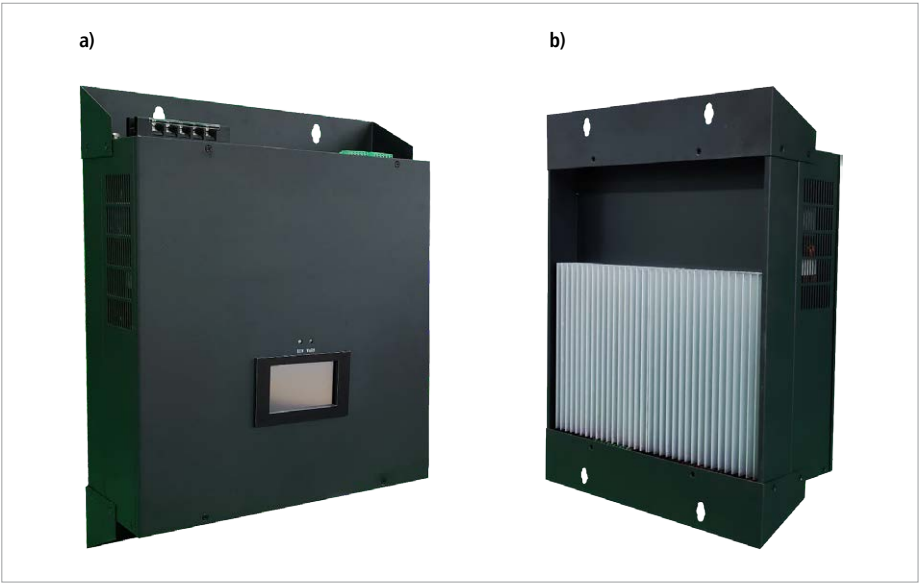
Kompensacja mocy biernej stanowi kluczowy element zapewnienia efektywności energetycznej oraz stabilności pracy sieci elektroenergetycznych. W warunkach rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz dynamicznie zmieniających się profili obciążenia, konieczne staje się stosowanie zaawansowanych rozwiązań technicznych, które umożliwiają utrzymanie odpowiedniego poziomu współczynnika mocy. Współczynnik mocy, określany jako $\cos \varphi$, jest jednym z podstawowych wskaźników jakości energii elektrycznej, którego wartość wpływa bezpośrednio na koszty eksploatacji instalacji oraz na obciążenie sieci przesyłowych.

W kontekście ekonomicznym, niewłaściwa kompensacja mocy biernej może prowadzić do znaczących kosztów związanych z poborem energii biernej, zwłaszcza w przypadku energii biernej pojemnościowej, której cena jest trzykrotnie wyższa niż energii biernej indukcyjnej. W odpowiedzi na te wyzwania, coraz większą popularność zdobywają statyczne generatory mocy biernej (SVG), które dzięki swojej konstrukcji oraz zaawansowanym algorytmom sterowania umożliwiają precyzyjną i dynamiczną kompensację mocy biernej. Urządzenia te charakteryzują się krótkim czasem reakcji oraz zdolnością do pracy w różnych warunkach obciążenia, co czyni je idealnym rozwiązaniem dla przemysłowych i komercyjnych instalacji elektroenergetycznych. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących oceny jakości kompensacji mocy biernej z wykorzystaniem statycznego generatora SVG w warunkach ob-

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono ocenę jakości kompensacji mocy biernej z wykorzystaniem statycznego generatora SVG w warunkach obciążenia trójfazowego. Analiza obejmowała pomiary mocy czynnej, biernej oraz współczynnika mocy, z uwzględnieniem pięciu charakterystycznych etapów pracy układu. Wyniki potwierdziły skuteczność kompensacji, utrzymując współczynnik mocy na poziomie 0,98, co pozwala na redukcję kosztów energetycznych oraz spełnienie wymagań technicznych. Badania przeprowadzono przy użyciu analizatora jakości energii PQ-BOX 150, zapewniającego wysoką dokładność pomiarów.

Słowa kluczowe: kompensacja mocy biernej, generator SVG.



Rys. 1. Widok zewnętrzny statycznego generatora mocy biernej SVG o mocy 10 kvar w wykonaniu z chłodzeniem pasywnym: a) widok z przodu, b) widok z tyłu

ciążenia trójfazowego. Szczególną uwagę poświęcono analizie wpływu kompensacji na stabilność współczynnika mocy oraz na redukcję kosztów związanych z poborem energii biernej.

Współczynnik mocy jako wskaźnik jakości kompensacji

Ocena jakości kompensacji mocy biernej może być prowadzona na dwóch płaszczyznach: ekonomicznej i technicznej. Pierwsza z nich jest możliwa do oceny na podstawie zapisów na fakturze za sprzedaż energii elektrycznej. Dla konsumentów, dla których przewidzenie jest rozliczanie zakupu energii biernej, widnieje zapis określający koszty poniesione z tego

tytułu. Dla odbiorców z grupy V, czyli podłączonych do sieci niskiego napięcia, rozróżnia się pobór energii biernej o charakterze indukcyjnym i pojemnościowym. Nie wchodzi w szczególności sposobu rozliczania tych dwóch rodzajów energii, należy zauważyć różnice kosztowe z tego wynikające. Cena energii biernej pojemnościowej jest trzykrotnie wyższa niż energia bierna indukcyjna. Eliminacja tych dodatkowych kosztów jest podstawowym kryterium oceny skuteczności układu do kompensacji mocy biernej ze strony klienta końcowego.

Kryterium techniczne oparte jest w aktach prawnych na wartości współczynnika $\tan \varphi$. W instalacjach elektrycznych częściej stosowany jest

jednak współczynnik mocy $\cos \varphi$. Współczynnik ten wyznaczany jest zgodnie ze wzorem (1).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \tag{1}$$

Ponownie rozróżniamy wymagania dla dwóch charakterów mocy biernej. Dla mocy biernej o charakterze pojemnościowym wymaganie jest trywialnie proste – każda jej ilość jest rejestrowana i obciążona dodatkowymi opłatami. Dla mocy biernej o charakterze indukcyjnym wymagane jest, aby $\tan \varphi$, w typowych przypadkach, zawierał się w granicy od 0 do 0,4. Odpowiada to współczynnikowi mocy 0,928 – 1,000. Sama wartość współczynnika $\tan \varphi$ wyliczana jest zgodnie ze wzorem przedstawionym w Rozporządzeniu [1] i nie jest przedmiotem rozważań w niniejszym artykule. Utrzymanie odpowiedniej wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$ pozwala na zniwelowanie opłat z tytułu ponadumownego poboru mocy biernej indukcyjnej. Typowe wartości nastaw dla urządzeń kompensacyjnych mieszczą się w zakresie 0,96 – 0,98. Pierwsza wartość pozwala na utrzymanie wypadkowego współczynnika mocy powyżej dolnego progu wymaganego. Druga wartość zapewnia zarówno wysoki poziom kompensacji (mało mocy i energii biernej pobieranej z sieci) przy zapewnieniu buforu ograniczającego ryzyko przekompensowania układu w przypadku dynamicznych zmian poboru i charakteru mocy biernej. Tym samym utrzymanie wartości tego współczynnika podczas pracy układu kompensacji mocy biernej (UKMB) może być uznane za wskaźnik jakości działania tego układu. Jeżeli w czasie pracy UKMB nie wystąpią przedziały czasu, w których pojawiają się pobór energii biernej o charakterze pojemnościowym ani nadmierny pobór mocy biernej o charakterze indukcyjnym, przyjmujemy, że układ działa prawidłowo.

Obiekt badań – statyczny generator mocy biernej SVG

Stacyjny generator mocy biernej SVG (rys. 1.), stanowiący przedmiot badań, jest urządzeniem przeznaczonym do kompensacji mocy biernej w sieciach trójfazowych [2]. Jego konstrukcja umożliwia pracę zarówno w trybie kompensacji mocy biernej o charakterze indukcyjnym, jak i pojemnościowym, co pozwala na elastyczne dostosowanie do zmieniających się warunków obciążenia. Generator został zaprojektowany do pracy w sieci o napięciu znamionowym 400 V AC $\pm 10\%$ oraz częstotliwości 50 Hz $\pm 3\%$. Czas reakcji urządzenia, wynoszący poni-

żej 100 μ s, zapewnia szybką i precyzyjną regulację, co jest kluczowe dla utrzymania stabilności parametrów sieci. Dodatkowo, średni czas odpowiedzi całkowitej, nieprzekraczający 10 ms, gwarantuje skuteczną reakcję na dynamiczne zmiany obciążenia.

W badaniach wykorzystano model SVG o mocy znamionowej 10 kvar. Jest on dostępny w dwóch wersjach: z chłodzeniem mechanicznym (wymuszonym) oraz pasywnym (grawitacyjnym). Wersja z chłodzeniem mechanicznym charakteryzuje się poziomem głośności poniżej 65 dB, podczas gdy wersja pasywna generuje hałas na poziomie poniżej 40 dB, co czyni ją bardziej odpowiednią do zastosowań w środowiskach wymagających cichej pracy. Obie wersje wyposażone są w port komunikacyjny RS485 oraz protokół MODBUS RTU, co umożliwia integrację z systemami nadzoru i sterowania. Straty mocy czynnej w urządzeniu nie przekraczają 3%, co świadczy o jego wysokiej efektywności energetycznej. Stopień ochrony obudowy IP3X zapewnia odporność na warunki środowiskowe, co jest istotne dla pracy w warunkach przemysłowych.

Generator SVG posiada również funkcje symetryzacji oraz filtracji harmonicznych, gdzie filtracja obejmuje harmoniczne od 3 do 13. Temperatura pracy generatora mieści się w zakresie od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$, co pozwala na jego eks-

wiskach wymagających cichej pracy. Obie wersje wyposażone są w port komunikacyjny RS485 oraz protokół MODBUS RTU, co umożliwia integrację z systemami nadzoru i sterowania. Straty mocy czynnej w urządzeniu nie przekraczają 3%, co świadczy o jego wysokiej efektywności energetycznej. Stopień ochrony obudowy IP3X zapewnia odporność na warunki środowiskowe, co jest istotne dla pracy w warunkach przemysłowych.

Generator SVG posiada również funkcje symetryzacji oraz filtracji harmonicznych, gdzie filtracja obejmuje harmoniczne od 3 do 13. Temperatura pracy generatora mieści się w zakresie od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$, co pozwala na jego eks-

Nazwa parametru	Jednostka	SVG 10 kvar z wentylatorami	SVG 10 kvar bez wentylatorów (pasywny)
Moc znamionowa	kvar	10	
Napięcie znamionowe	V AC	400 V $\pm 10\%$	
Częstotliwość sieci	Hz	50 Hz $\pm 3\%$	
Rodzaj sieci	–	3P5W	
Czas reakcji	μ s	< 100	
Odpowiedź całkowita	ms	< 10	
Częstotliwość przełączania (średnia)	kHz	20	
Port komunikacyjny	–	RS485	
Protokół komunikacyjny	–	MODBUS RTU	
Wyświetlacz	–	dotykowy	
Straty mocy czynnej	%	< 3	
Stopień ochrony obudowy	–	IP3X	
Chłodzenie	–	wymuszone, mechaniczne (z wentylatorami)	pasywne, grawitacyjne (bez wentylatorów)
Poziom głośności pracy	dB	< 65	< 40
Funkcje podstawowe	–	kompensacja mocy biernej indukcyjna/pojemnościowa, symetryzacja obciążenia, uzupełniająca filtracja harmonicznych	kompensacja mocy biernej indukcyjna/pojemnościowa, symetryzacja obciążenia
Kompensacja harmonicznych	–	3–13 (z wyborem harmonicznych)	nie dotyczy wykonania pasywnego
Wymiary (HxDxW)	mm	550x88x423	550x160x423
Waga	kg	ok. 15	ok. 16
Temperatura otoczenia	$^{\circ}\text{C}$	-20 do $+50$	
Temperatura przechowywania	$^{\circ}\text{C}$	-10 do $+60$	
Wilgotność względna	%	5 do 95, bez kondensacji	
Wysokość pracy	m n.p.m.	≤ 1500	
Środowisko pracy	–	bez pyłów, gazów łatwopalnych	

Tab. 1. Parametry techniczne generatorów SVG 10 kvar z wentylatorami i bez



Rys. 2. Widok stanowiska szkoleniowego SVG z zainstalowanym kompensatorem SVG 10 kvar w wykonaniu tradycyjnym (z chłodzeniem mechanicznym)

ploatację w szerokim spektrum warunków środowiskowych.

I Układ pomiarowy i metodyka

Stanowisko pomiarowe, przedstawione na rysunku 2., zostało wyposażone w statyczny generator mocy biernej SVG o mocy 10 kvar, w wersji z chłodzeniem mechanicznym. Układ umożliwia niezależne włączanie obciążenia re-

zystancyjnego, pojemnościowego oraz indukcyjnego, zarówno w konfiguracji jednofazowej, jak i trójfazowej. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano wyłącznie obciążenie trójfazowe, co pozwoliło na symulację warunków zbliżonych do rzeczywistych układów przemysłowych. Kompensator SVG został podłączony do przekładników prądowych niskiego napięcia o przekładni 50/5 A/A, klasie dokładności 0,2 s

Etap	Zakres czasu	Wartość	P [kW]	QV [kVar]	cos φ [-]
A (SVG wyłączony)	12:58:10–12:58:28	L1	1,589	–0,198	–0,9923
		L2	1,559	–0,203	–0,9916
		L3	1,626	–0,217	–0,9912
		Σ	4,774	–0,619	–0,9917
B (narastanie kompensacji)	12:58:29–12:58:35	L1	1,573	–0,139	–0,9959
		L2	1,596	–0,169	–0,9943
		L3	1,624	–0,149	–0,9956
		Σ	4,792	–0,456	–0,9953
C (przejście Q≈0 i szybkie narastanie)	12:58:36–12:58:40	L1	1,578	+0,129	0,9959
		L2	1,604	+0,116	0,9965
		L3	1,633	+0,130	0,9960
		Σ	4,815	+0,376	0,9962
D (praca stabilna)	12:58:41–12:59:00	L1	1,590	+0,225	0,9901
		L2	1,616	+0,214	0,9914
		L3	1,646	+0,229	0,9905
		Σ	4,852	+0,668	0,9907
E (po wyłączeniu – powrót do pojemnościowej)	12:59:02–12:59:10	L1	1,590	–0,196	–0,9925
		L2	1,553	–0,197	–0,9921
		L3	1,631	–0,215	–0,9915
		Σ	4,775	–0,607	–0,9920

Tab. 2. Średnie wartości mocy czynnej P, mocy biernej QV oraz współczynnika mocy cos φ (składowa podstawowa 50 Hz) w kolejnych etapach A–E cyklu pracy kompensatora SVG (pomiar PQ-BOX)

oraz mocy 2,5 VA, co zapewniło precyzyjny pomiar prądów w obwodzie.

Pomiary parametrów elektrycznych realizowane były za pomocą zewnętrznego analizatora jakości energii elektrycznej PQ-BOX 150 firmy A-Eberle [3]. Urządzenie to umożliwia rejestrację danych z wysoką rozdzielczością, co jest kluczowe dla analizy dynamicznych zmian w sieci. Rejestracja parametrów, takich jak moc czynna, moc bierna oraz współczynnik mocy, odbywała się w interwałach 1-sekundowych. Takie podejście pozwoliło na dokładne śledzenie zmian w czasie rzeczywistym oraz identyfikację ewentualnych nieprawidłowości w pracy układu kompensacji.

Metodyka badań zakładała rejestrację parametrów pracy układu w różnych stanach obciążenia, z uwzględnieniem fazy włączania i wyłączania kompensatora SVG. Dzięki temu możliwe było określenie skuteczności kompensacji mocy biernej oraz stabilności współczynnika mocy w warunkach dynamicznych. Uzyskane wyniki, przedstawione w dalszej części artykułu, stanowią podstawę do oceny jakości działania układu oraz jego zgodności z wymaganiami technicznymi i ekonomicznymi.

Wyniki pomiarów dla obciążenia trójfazowego

W ramach przeprowadzonych badań zarejestrowano przebiegi czasowe mocy czynnej P, mocy biernej składowej podstawowej częstotliwości 50 Hz QV oraz współczynnika mocy cos φ dla trzech faz (L1–L3) podczas jednego cyklu pracy statycznego generatora mocy biernej SVG. Pomiar wykonano przy użyciu zewnętrznego analizatora jakości energii A-Eberle PQ-BOX 150, który zapewnia wyższą dokładność rejestracji parametrów elektrycznych w porównaniu z wbudowanymi funkcjami pomiarowymi samego urządzenia SVG. Analizator PQ-BOX 150 wyposażony jest w 24-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, podczas gdy SVG wykorzystuje przetwornik 12-bitowy, co przekłada się na większą rozdzielczość i precyzję pomiaru. Celem analizy było określenie skuteczności kompensacji mocy biernej oraz stabilności współczynnika mocy w warunkach dynamicznych zmian obciążenia.

Na podstawie uzyskanych wyników wydzielono pięć charakterystycznych etapów pracy układu, oznaczonych jako A, B, C, D i E, które odpowiadają kolejno: pracy bez kompensacji, narastaniu kompensacji, przejściu przez zero mocy biernej, stabilnej pracy przy nastawie cos φ = 0,98 oraz powrocie do stanu wyjściowego po wyłączeniu SVG.

Na rysunku 3. przedstawiono zarejestrowane przebiegi, z podziałem na etapy A–E, które zostały dodatkowo zaznaczone czterema punktami kontrolnymi (1–4). Etap A obejmuje okres, w którym SVG był wyłączony, a obciążenie miało charakter pojemnościowy, co widoczne jest jako ujemne wartości mocy biernej QV. Etap B ilustruje moment rozpoczęcia kompensacji oraz narastania wartości mocy biernej. Etap C przedstawia przejście przez punkt, w którym moc bierna osiąga wartość bliską zero, a następnie szybko narasta do wartości dodatnich. Etap D charakteryzuje się stabilną pracą układu przy zadanej nastawie współczynnika mocy cos φ = 0,98, co potwierdza utrzymanie się mocy biernej na poziomie dodatnim oraz stabilizację współczynnika mocy. Etap E pokazuje powrót do stanu wyjściowego po wyłączeniu SVG, w którym obciążenie ponownie przyjmuje charakter pojemnościowy. Punkty kontrolne 1–4 zaznaczają kluczowe momenty przejścia między etapami, co umożliwia dokładną analizę dynamiki procesu kompensacji.

W ramach przeprowadzonych badań zarejestrowano przebiegi czasowe mocy czynnej P, mocy biernej składowej podstawowej QV oraz współczynnika mocy cos φ dla trzech faz (L1–L3) podczas jednego cyklu pracy statycznego generatora mocy biernej SVG.

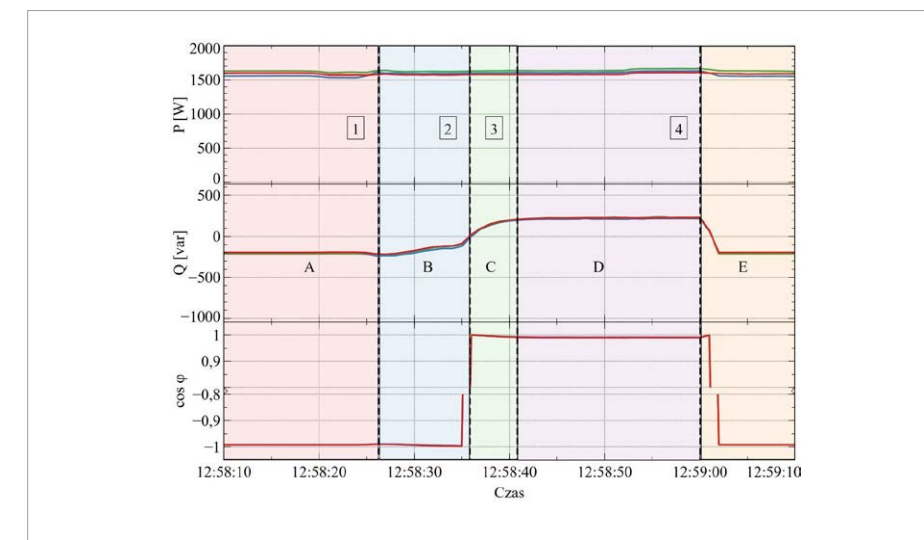
Na podstawie uzyskanych wyników wydzielono pięć charakterystycznych etapów pracy układu, oznaczonych jako A, B, C, D i E. W etapie D, odpowiadającym stabilnej pracy kompensatora SVG, średnia moc czynna wyniosła 1,617 kW, a moc bierna osiągnęła wartość +0,223 kvar, co świadczy o skutecznej kompensacji mocy biernej indukcyjnej. Współczynnik mocy cos φ ustabilizował się na poziomie 0,9907, co jest zgodne z zadaną wartością nastawy cos φ = 0,98. Należy podkreślić, że samo urządzenie SVG wskazywało wartość współczynnika mocy zbliżoną do poziomu 0,98, co potwierdza spójność pomiarów

ABSTRACT

Quality assessment of reactive power compensation using a static var generator under three-phase load conditions

The paper evaluates the quality of reactive power compensation using a static SVG generator under three-phase load conditions. The analysis included measurements of active power, reactive power, and power factor of active power, reactive power, and power factor, considering five characteristic stages of system operation. The results confirmed the effectiveness of compensation, maintaining the power factor at 0.98, which reduces energy costs and meets technical requirements. Measurements were conducted using the PQ-BOX 150 power quality analyzer, ensuring high measurement accuracy.

Keywords:



Rys. 3. Przebiegi czasowe mocy czynnej P [W], mocy biernej składowej podstawowej QV [Var] oraz współczynnika mocy cos φ (50 Hz) zarejestrowane dla faz L1–L3 podczas jednego cyklu pracy statycznego generatora mocy biernej SVG (pomiar analizatorem jakości energii A-Eberle PQ-BOX). Wydzielono etapy pracy: A – SVG wyłączony (charakter pojemnościowy), B – rozpoczęcie kompensacji i narastanie QV, C – przejście przez QV≈0 i szybkie dojście do wartości dodatnich, D – praca stabilna przy nastawie cos φ set = +0,98 (indukcyjnie/opóźniająco), E – wyłączenie SVG i powrót do charakteru pojemnościowego; granice etapów zaznaczono liniami przerywanymi

zewnętrznego analizatora z danymi wyjściowymi kompensatora. Taki stan potwierdza prawidłowe działanie układu kompensacji, który zapewnia utrzymanie współczynnika mocy w granicach wymaganych przez normy techniczne i ekonomiczne.

W etapach B i C zaobserwowano dynamiczne zmiany parametrów, związane z włączaniem i narastaniem kompensacji. W etapie B moc bierna stopniowo zmniejszała swoją wartość ujemną, co świadczy o rozpoczęciu procesu kompensacji. W etapie C nastąpiło przejście przez punkt zerowy mocy biernej oraz szybkie osiągnięcie wartości dodatnich, co potwierdza skuteczność i dynamikę działania kompensatora. Etapy te ilustrują proces uruchamiania urządzenia i dostosowywania się do rzeczywistych parametrów sieci.

I Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność statycznego generatora mocy biernej SVG w kompensacji mocy biernej w warunkach obciążenia trójfazowego. Analiza wyników pomiarowych wykazała, że zastosowanie kompensatora SVG pozwala na utrzymanie współczynnika mocy cos φ na poziomie zbliżonym do 0,98, co jest zgodne z wymaganiami technicznymi oraz ekonomicznymi. W szczególności, w etapie stabilnej pracy kompensatora (etap D), średnia wartość współczynnika mocy osiągnęła poziom 0,9907, co świadczy o wysokiej efektywności urządzenia. Ponadto, porównanie wyników uzyskanych przed i po kompensacji (etapy A i E) po-

twierdziło, że warunki obciążenia pozostały niezmienione, co pozwala na jednoznaczną ocenę wpływu kompensatora na parametry sieci. Wyniki te wskazują, że statyczne generatory mocy biernej SVG stanowią skuteczne narzędzie do poprawy jakości energii elektrycznej oraz optymalizacji kosztów eksploatacyjnych instalacji elektroenergetycznych.

I Literatura

- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 29 listopada 2022 r. w sprawie sposobu kształtowania i kalkulacji taryf oraz sposobu rozliczeń w obrocie energią elektryczną (Dz.U. 2022 poz. 2505).
- <https://astat-energetyka.pl/produkt/jakosc-energii-elektrycznej/svg-statyczne-generatory-mocy-biernej/generator-mocy-biernej-svg-10-kvar-400-v-svg10/> (dostęp z dnia 10.02.2026)
- <https://astat.pl/produkty/przenosne-analizatory-jakosci-energii-elektrycznej-aeb-101-7311-0000/> [dostęp: 10.02.2026].

ASTAT

ASTAT Sp. z o.o.

60-451 Poznań, ul. Dąbrowskiego 441

tel. 61 848 88 71, faks 61 848 82 76

info@astat.pl

www.astat.pl

Kompensacja mocy biernej na farmach wiatrowych oraz fotowoltaicznych

W przypadku farm wiatrowych oraz fotowoltaicznych podstawowym i najważniejszym dla użytkownika parametrem jest generowana moc czynna, która w sposób bezpośredni przekłada się na zysk. Jednakże nie bez znaczenia pozostają kwestie zapewnienia prawidłowej wartości mocy biernej – zarówno do kompensacji mocy biernej pojemnościowej kabli w trakcie przestoju farmy, jak i w celu spełnienia warunków kodeksu sieciowego NC RfG w zakresie zapewnienia regulacyjności mocy biernej. To drugie jest szczególnie uciążliwe dla jednostek klasyfikowanych jako moduły wytwarzania energii typu D, czyli dla obiektów z punktem przyłączeniowym po stronie WN.

W implementacji krajowej, czyli w wymogach ogólnego stosowania dla Kodeksu NC RfG, zostały przyjęte następujące charakterystyki zakresu regulacji:

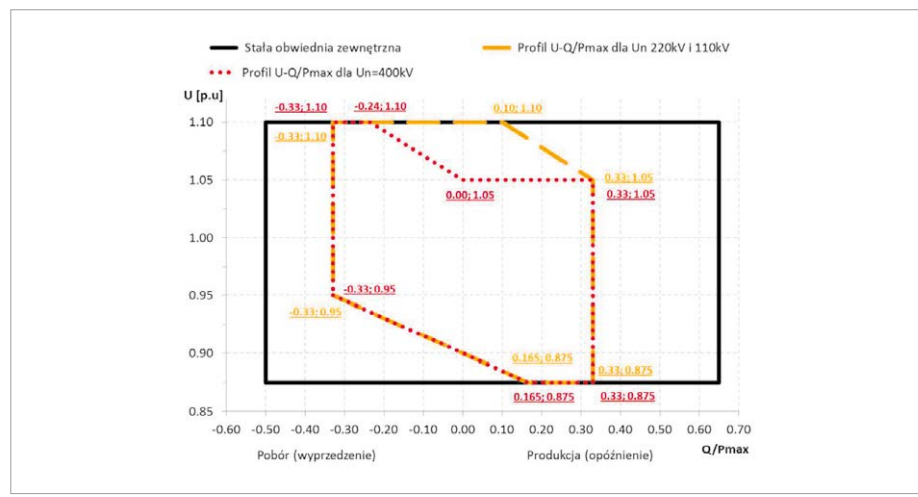
a) generacja mocy biernej przy maksymalnej mocy czynnej:

Na wykresie (rys. 1.) przedstawiono granice profilu U-Q/Pmax z podziałem na wartości napięcia w punkcie przyłączenia, wyrażane jako stosunek jego rzeczywistej wartości i napięcia referencyjnego 1 pu, w porównaniu ze stosunkiem mocy biernej (Q) do mocy maksymalnej (Pmax).

Położenie, wielkość i kształt obwiedni wewnętrznej zostały osobno zaznaczone dla napięcia sieci 400 kV (czerwoną linią kropkowaną) oraz dla sieci o napięciu 220 kV i 110 kV (pomarańczową linią kreskową).

b) generacja mocy biernej przy mocy czynnej poniżej maksymalnej:

Na wykresie (rys. 2.) przedstawiono granice profilu P-Q/Pmax w punkcie przyłączenia, wyrażone jako stosunek jego rzeczywistej mocy



Rys. 1. Profil U-Q/Pmax modułu parku energii (dla mocy maksymalnej)

czynnej do mocy maksymalnej w jednostkach względnych (pu), względem stosunku mocy biernej (Q) do mocy maksymalnej (Pmax).

Ważną kwestią jest odniesienie wartości mocy biernej do mocy maksymalnej, która według Ko-

deksu NC RfG oznacza „maksymalną wartość mocy czynnej, którą moduł wytwarzania energii jest w stanie generować w sposób ciągły, pomniejszoną o każde zapotrzebowanie związane wyłącznie z pracą tego modułu wytwarzania energii i niewprowadzane do sieci, jak określono w umowie przyłączeniowej lub jak uzgodnili właściwy operator systemu i właściciel zakładu wytwarzania energii”.

Ważny jest też wymóg, na który niewiele osób zwraca uwagę: farma musi mieć możliwość zapewnienia mocy biernej w każdym punkcie pracy w ramach profilu.

Oznacza to, że nie wystarczy jedynie wykazać dyspozycyjności maksymalnej wymaganej wartości mocy biernej, ale również zapewnić jej regulację. Co za tym idzie, tradycyjne układy baterii kondensatorów i dławików kompensacyjnych mogą odgrywać tylko rolę pomocniczą, zaś urządzenia farmy (turbiny lub inwertery) muszą doregulowywać moc bierną. Jest to problematyczne szczególnie w przypadku farm fotowoltaicznych,



Fot. 1. Tradycyjne urządzenia kompensacyjne – bateria kondensatorów BSND-2yz-30 30kV, 11 MVar

gdzie przy maksymalnej mocy inwertera nie może on generować mocy biernej (praca przy $\cos \varphi = 1$).

Rozwiązaniem umożliwiającym płynną regulację mocy biernej są zyskujące coraz większą popularność układy aktywne **STATCOM/SVG**, oparte na technologii tranzystorów IGBT, stero-

wane z pozycji rozdzielni 110 kV poprzez protokół transmisji.

Z elektrycznego punktu widzenia układ STATCOM stanowi sterowane napięciowo źródło prądu. Część elektryczna układu STATCOM składa się z:



Fot. 2. Tradycyjne urządzenia kompensacyjne – układ dławików kompensacyjnych 4,4 Mvar + 7,75 Mvar/31,5 kV

- » zestawu połączonych szeregowo jednostek mocy, opartych na tranzystorach IGBT,
- » reaktancji pośredniczącej (dławika powietrznego),
- » układu wstępnego ładowania kondensatorów DC jednostek mocy.

Dlaczego warto prenumerować elektro.info?

- » 10 numerów w roku (numery łączone: 1/2, 7/8 – w cenie numeru pojedynczego)
- » Przesyłka na koszt wydawnictwa
- » Prenumerata w formie pdf do pobrania na nośnik zewnętrzny (laptop, tablet itp.)
- » Link do pobrania wersji pdf czasopisma otrzymujesz niezwłocznie po ukazaniu się danego numeru
- » Dostęp do wszystkich treści zamieszczonych na stronie internetowej www.elektro.info.pl otrzymujesz niezwłocznie po zaksięgowaniu wpłaty na konto

Prenumerata papierowa



EDUKACYJNA ROCZNA

10 numerów + roczny dostęp do wszystkich treści portalu (365 dni)

cena: 145,00 zł

PÓŁROCZNA

5 numerów + półroczny dostęp do wszystkich treści portalu (183 dni)

cena: 145,00 zł

ROCZNA

10 numerów + roczny dostęp do wszystkich treści portalu (365 dni)

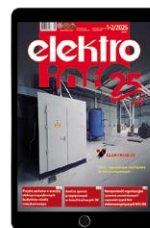
cena: 250,00 zł

DWULETNI

20 numerów + dwuletni dostęp do wszystkich treści portalu (730 dni)

cena: 425,00 zł

Prenumerata PDF



ROCZNA

10 numerów + roczny dostęp do wszystkich treści portalu (365 dni)

cena: 225,00 zł

DWULETNI

20 numerów + dwuletni dostęp do wszystkich treści portalu (730 dni)

cena: 382,00 zł

Prenumerata papierowa + PDF



ROCZNA

10 numerów + roczny dostęp do wszystkich treści portalu (365 dni)

cena: 362,00 zł

DWULETNI

20 numerów + dwuletni dostęp do wszystkich treści portalu (730 dni)

cena: 616,00 zł

FORMULARZ ZAMÓWIENIA

Zamawiam:

■ Prenumeratę papierową:

☐ edukacyjną – 145 zł ☐ półroczną – 145 zł

☐ roczną – 250 zł ☐ dwuletnią – 425 zł od numeru

■ Prenumeratę PDF:

☐ roczną – 225 zł ☐ dwuletnią – 382 zł od numeru

■ Prenumeratę papierową + PDF:

☐ roczną – 362 zł ☐ dwuletnią – 616 zł od numeru

Nazwa firmy

Ulica i numer

Kod pocztowy

Miejscowość

Osoba zamawiająca

Rodzaj działalności

NIP

Telefon kontaktowy

e-mail:

Wysyłka będzie realizowana po dokonaniu wpłaty na konto:
Volksbanken Bank Polska S.A., 09 2130 0004 2001 0616 6862 0001

Administratorem Państwa danych osobowych jest Grupa MEDIUM Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp.K., nr KRS: 0000537655, z siedzibą w 04-112 Warszawa, ul. Karłowicza 18, tel. +48 22 810-21-24, wydawca elektro.info. Wyrażam zgodę na przetwarzanie moich danych osobowych przez Grupę MEDIUM Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp.K. w celu zamówienia prenumeraty. Przystępuję Pani/Panu prawo do wglądu do swoich danych, aktualizowania, poprawiania oraz całkowitego usunięcia ich, a także wniesienia sprzeciwu wobec ich przetwarzania. Podanie danych ma charakter dobrowolny. Dane są chronione zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r.

Upoważniam GRUPĘ MEDIUM do wystawienia faktury VAT bez podpisu odbiorcy.
Data: Podpis:



Fot. 3. Układ STATCOM 5,5 Mvar/30 kV

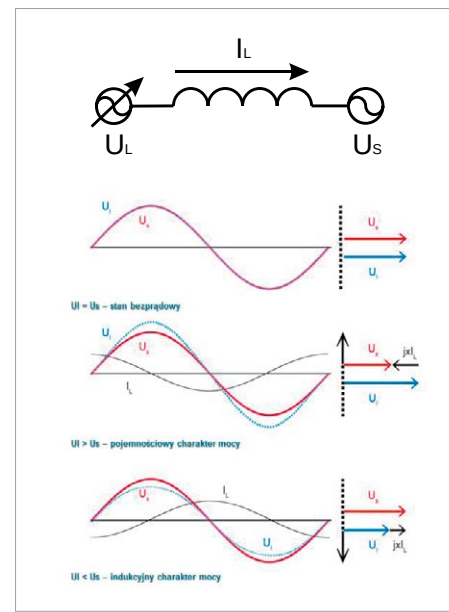
Poprzez sterowanie wartością napięcia U_L na jednostkach mocy, uzyskiwany jest przepływ prądu przez reaktancję pośredniczącą, którego charakter i wartość są zależne od stosunku napięcia sieci U_S oraz napięcia na modułach mocy U_L (rys. 3).

Oznacza to, że przy wykorzystaniu jednego pola rozdzielni SN oraz jednego stanowiska kompensacyjnego możemy zbudować układ, który w zależności od potrzeb będzie źródłem mocy biernej indukcyjnej lub pojemnościowej. Do dodatkowych zalet należą:

- » bezstopniowa regulacja,
- » brak zużycia aparatury łączeniowej,
- » niewrażliwość na zjawiska rezonansowe,

» brak zjawisk niestabilnych towarzyszących operacjom łączeniowym baterii kondensatorów oraz dławików kompensacyjnych.

Oprócz możliwości zapewnienia dowolnej wymaganej wartości mocy biernej, bezstopniowa regulacja ma również znaczną wagę w przypadku kompensacji mocy biernej linii kablowych, w szczególności przy rozruchach farmy. Zastosowanie tego typu układów pozwala na uniknięcie sytuacji, gdzie moc dobranego w tym celu dławika kompensacyjnego okazuje się przeszacowana lub – co gorsza – niedoszacowana. Umożliwia ona również zastosowanie jednego, przewymiarowanego układu kompensacyjnego w przypadku



Rys. 3. Zasada działania układu STATCOM

obiektów, gdzie planowana jest dalsza rozbudowa.

Kolejną zaletą układów aktywnych jest eliminacja zakłóceń towarzyszących operacjom łączeniowym układów pasywnych. Te z kolei, szczególnie w przypadku dławików kompensacyjnych, są znaczące i mogą prowadzić do uszkodzenia układów elektronicznych czy energoelektronicznych, o aparaturze łączeniowej nie wspominając.

Układy tego typu pozwalają na ograniczenie lub wręcz uniknięcie, w zależności od rodzaju farmy:

- » konieczności zastosowania osobnych układów STATCOM w gondolach turbin wiatrowych,
- » wykorzystania turbin na farmach wiatrowych czy inwerterów na farmach fotowoltaicznych do generacji wymaganej mocy biernej,
- » konieczności zaniżania mocy maksymalnej farmy w przypadku farm fotowoltaicznych.

Literatura

1. Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r., ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci; Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L112 z 27 kwietnia 2016 r.
2. Wymogi ogólnego stosowania wynikające z Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r., ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG), PSE S.A., Konstancin-Jeziorna, 18 grudnia 2018.
3. Materiały własne ELMA Energia Sp. z o.o.


Rys. 4. Brak stanów niestabilnych przy operacjach łączeniowych – zmiana charakteru mocy układu w zakresie ± 11 Mvar przy napięciu 30 kV. Wykres górny: napięcie na szynach rozdzielni 30 kV. Wykres dolny: prąd układu SVG

JEAN MÜLLER THE NAME FOR SAFETY



Kompensujemy moc bierną - sprawdź naszą ofertę



KONDENSATORY LKT



FILTRY AKTYWNE I PASYWNE



DŁAWIKI FILTRUJĄCE



STYCZNIKI DO KONDENSATORÓW



REGULATOR MOCY BIERNEJ



JEAN MUELLER POLSKA
Oficjalny przedstawiciel FRAKO na rynku polskim

Pełna oferta na:
WWW.FRAKO.PL

Kompensacja mocy biernej w układach PV współpracujących z instalacją przemysłową

Jednym z zagadnień, jakie należy rozpatrzyć w układach OZE współpracujących z siecią elektroenergetyczną, jest problem kompensacji mocy biernej i uzyskania wymaganego przez Operatora warunku: $\text{tg}\varphi < 0,4$ oraz $Q_c = 0,0$ kvarh, w opomiarowanym przez Operatora punkcie systemu elektroenergetycznego. Przez układy OZE można rozumieć: instalacje PV, farmy wiatrowe lub pojedyncze wiatraki, generatory gazowe (biogazownie), układy hybrydowe, np. PV + wiatrak(i) + biogazownia oraz pompy ciepła. W artykule zostanie omówiona sytuacja współpracy instalacji PV z instalacją przemysłową na podstawie rzeczywistych analiz, pomiarów oraz doboru i instalacji kompensatora dla działającego obiektu.

Na wstępie chcemy zwrócić uwagę na niektóre zjawiska zachodzące na szynach rozdzielni głównej RG współpracującej z instalacją OZE (dotyczy to wszystkich ww. źródeł). W tabeli 1. przedstawiono niektóre zachodzące zjawiska, mające wpływ na jakość

kompensacji. Przyjęto dla łatwiejszego zobrazowania problemu, że moc czynna P_z i bierna indukcyjna Q_L są stałe i wynoszą odpowiednio 100 kW i 100 kvar. W tabeli 1. zasymulowano zmienną moc czynną produkowaną przez OZE – $P_{\text{źródła}}$. W tabeli 1. przedstawiono (wyl-

czono) wartość wypadkowego $\text{tg}\varphi$ na szynach RG oraz wartość Δ kvar (moc baterii potrzebna do skompensowania mocy biernej indukcyjnej, aby został spełniony wymagany przez Operatora warunek $\text{tg}\varphi < 160,4$).

Łatwo zaobserwować, że przy stałych wartościach P_z i Q_L zmiany $\text{tg}\varphi$ na szynach RG wahają się od 1,00 do 100, a Δ kvar od 60 do 92 kvar. Należy pamiętać, że jest to spowodowane w tym przypadku tylko produkcją energii przez źródła OZE na wspólne szyny RG. Jeżeli doda się do tego jeszcze zmienność samej produkcji energii przez te źródła, łatwo można wysunąć wniosek, że w odróżnieniu od standardowej instalacji, instalacja współpracująca z OZE będzie wymagała znacznie uważniejszego podejścia do problemu kompensacji mocy biernej, a co za tym idzie likwidacji opłat z tego tytułu (większa moc baterii – o ok. 30%, więcej stopni kompensacyjnych o stosunkowo małej mocy).

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono podstawowe problemy związane z kompensacją mocy biernej w sieciach współpracujących z instalacją OZE, a szczególnie w układach PV współpracujących z instalacją przemysłową. Zaprezentowano również podstawowe wskaźniki oraz praktyczne sposoby, jak projektować i budować układy kompensacji, aby uniknąć niepotrzebnych kosztów oraz problemów związanych z tym zagadnieniem. Słowa kluczowe: moc bierna, moc bierna indukcyjna, moc bierna pojemnościowa, moc bierna odkształcona (moc dystorsji), kompensacja mocy biernej, $\text{tg}\varphi$, wyższe harmoniczne, kompensacja wyższych harmonicznych, automatyczne baterie kondensatorów, automatyczne baterie dławików kompensacyjnych, dynamiczne kompensatory mocy biernej, dynamiczne kompensatory mocy biernej z funkcją filtracji wyższych harmonicznych.

Analiza rzeczywistej realizacji kompensacji mocy biernej (Q_L i Q_C) w układach PV współpracujących z energetyczną siecią przemysłową.

Problem kompensacji konkretnego przypadku współpracy instalacji OZE z energetyczną siecią, np. zakładową, można przeprowadzić posługując się następującym schematem postępowania:

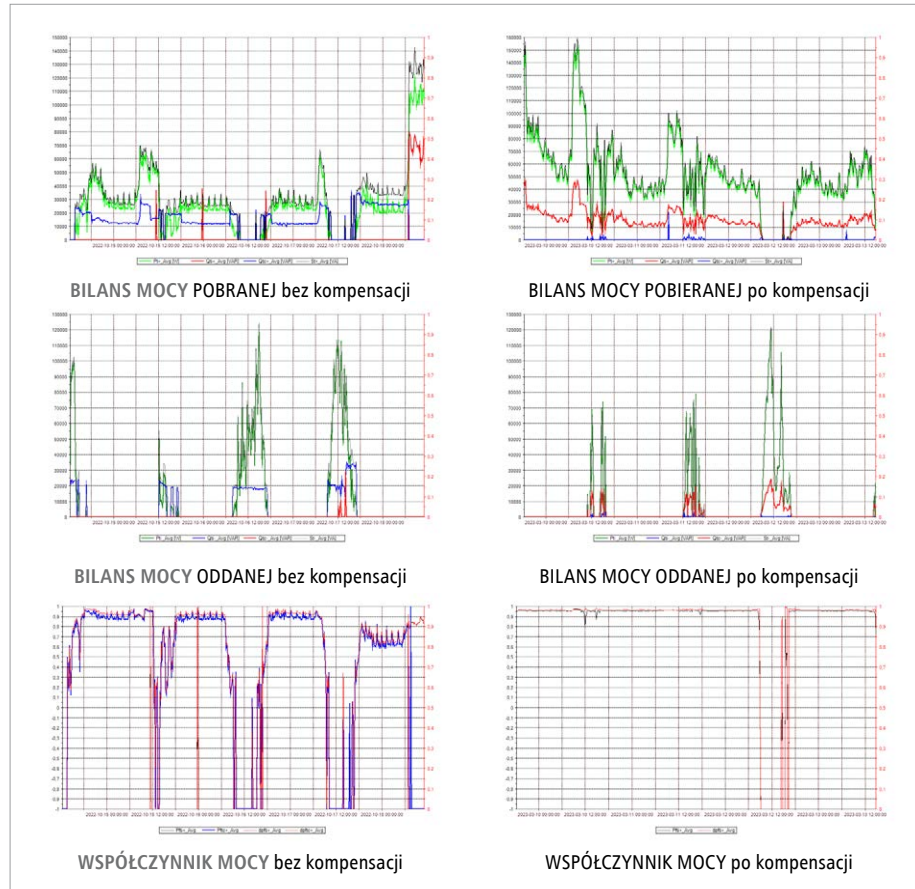
- » opis instalacji dla konkretnego zadania,
- » przedstawienie podstawowych problemów,
- » opis metody eliminowania zagrożeń (opłat) wynikających z niewłaściwie implementowanej kompensacji.

Opis instalacji: Zakład produkcyjny z terenu Słubic, moc zamówiona 250 kW, moc zapotrzebowana ok. 160,00 kW, moc instalacji PV 244,56 kWp (praktyczna 155 kW). Średnia wartość $\text{tg}\varphi$ na szynach rozdzielni głównej RG na poziomie $\text{tg}\varphi_{\text{na szynach RG}} = 0,42$. Miesięczna wartość energii pojemnościowej oddawanej do sieci na poziomie ok. 7,2 Mvarh. Taryfa rozliczeniowa B23. Transformator 1250 kVA bez kompensacji biegu jałowego.

L.p.	P_z	$P_{\text{źródła}}$	$P_{\text{na szynach RG}}$	Q_L	$\text{tg}\varphi$ na szynach RG	$\text{tg}\varphi$ wymagany	Δ kvar
1.	[kW]	[kW]	[kW]	[kvar]			[kvar]
2.	100	0	100	100	1,00	0,4	60
3.	100	10	90	100	1,11	0,4	64
4.	100	20	80	100	1,25	0,4	68
5.	100	30	70	100	1,43	0,4	72
6.	100	40	60	100	1,67	0,4	76
7.	100	50	50	100	2,00	0,4	80
8.	100	60	40	100	2,50	0,4	84
9.	100	70	30	100	3,33	0,4	88
10.	100	80	20	100	5,00	0,4	92
11.	100	90	10	100	10,00	0,4	96
12.	100	95	5	100	20,00	0,4	98
13.	100	99	1	100	100,00	0,4	99,6

Tab. 1. Symulacja zmienności $\text{tg}\varphi$ na szynach RG oraz zapotrzebowania Δ kvar dla poprawnej kompensacji

Opis problemu: Opłata z tytułu energii biernej pojemnościowej na poziomie ok. 2.500,00 zł netto miesięcznie (poziom cen z lipca 2022). Opłata z tytułu $\text{tg}\varphi > 0,4$ na poziomie ok. 150,00 zł netto miesięcznie. Duża dynamika zmian obciążenia mocą czynną na szynach



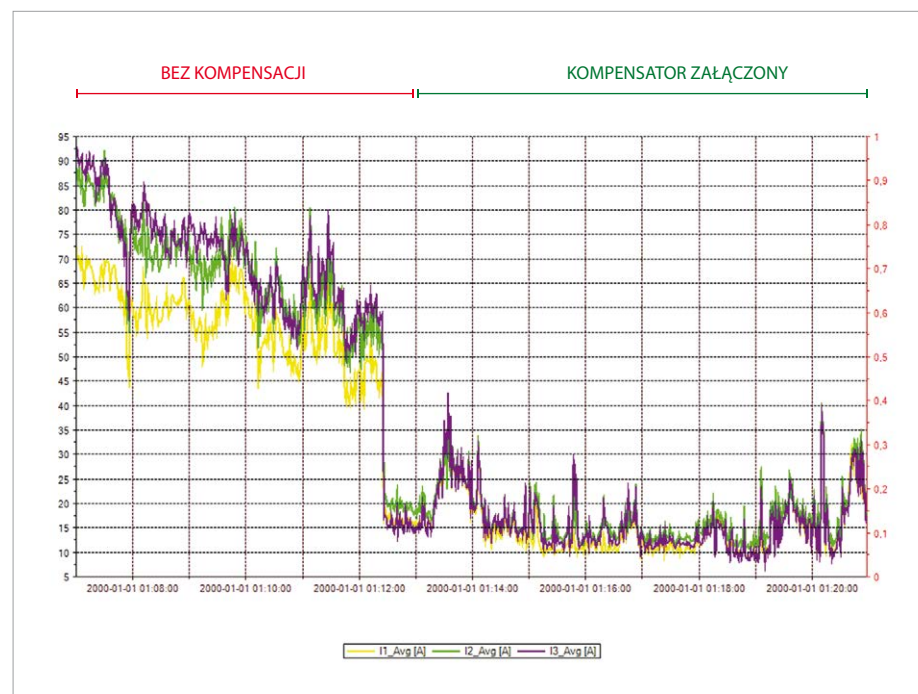
Rys. 1. Przykładowe przebiegi charakterystycznych wielkości opisywanego przykładu: bilans mocy pobranej, bilans mocy oddanej, współczynnik mocy. Bez kompensacji i po kompensacji rys. M. Żebrowski, J. Herlender

elektro info Profesjonalne szkolenia dla elektryków online!

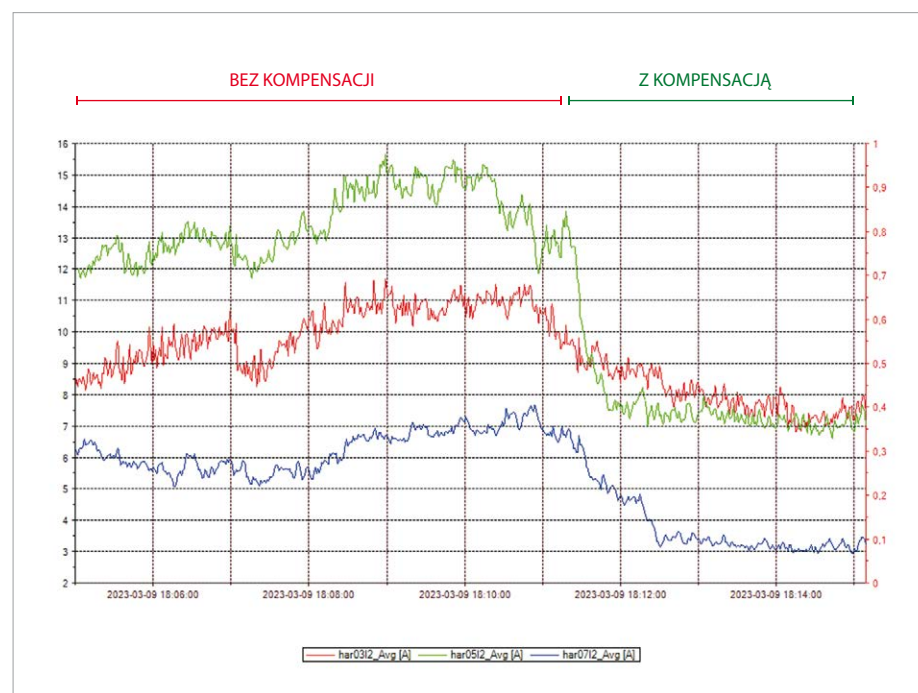
Kompensacja mocy biernej. Podstawy teoretyczne i zastosowania praktyczne.

Dostępne od ręki o każdej porze i bez względu na to, gdzie jesteś!

www.kursy.elektro.info.pl



Rys. 2. Symetryzacja prądu obciążenia rys. M. Żebrowski, J. Herlender



Rys. 3. Ograniczenie harmonicznych w prądzie rys. M. Żebrowski, J. Herlender

RG spowodowana współpracą z PV. Zawartość THDU na poziomie 3,5%, zawartość THDI 35%. Asymetria prądu na poziomie 30%.

Zastosowane rozwiązanie: Aktywny kompensator mocy biernej z funkcją redukcji harmonicznych typu ASVG 50 kvar oraz możliwość symetryzacji prądu obciążenia. Pomiar prądu i napięcia dla potrzeb kompensatora w trzech fazach po stronie nn 0,4 kV.

Na **rysunku 1.** przedstawiono porównanie przykładowych przebiegów charaktery-

stycznych wielkości opisywanego przykładu, przed instalacją urządzenia ASVG i po. Porównano takie wykresy jak: bilans mocy pobranej ($P+Q+S$), bilans mocy oddanej ($P+Q+S$), współczynnik mocy $\cos\phi$. Zastosowane rozwiązanie zredukowało moc bierną pojemnościową Q_c do poziomów minimalnych, co wyeliminowało opłaty z tego tytułu. Ograniczono moc bierną indukcyjną do poziomu zapewniającego spełnienie warunku dystrybucyjnego $tg\phi < 0,4$.

Dodatkowo w zakresie mocy kompensatora ASVG 50 uzyskano symetryzację prądu obciążenia. Aktualna asymetria waha się na poziomie ok. +1% (**rys. 2.**).

Przez zastosowanie opisanego układu do kompensacji (ASVG 50), uzyskano redukcję harmonicznych: 3. o ok. 10%, 5. o ok. 50% i 7. o ok. 50% (**rys. 3.**).

Uwagi końcowe

Aktywny kompensator zastosowano, ponieważ w układzie zaobserwowano:

- » Dynamiczne (gwałtowne) zmiany obciążenia mocą bierną w zakresie od –5 kvar CAP do +25 kvar IND, w okresie małego obciążenia na szynach RG (duża produkcja energii elektrycznej z instalacji PV w stosunku do aktualnych potrzeb zakładu),
- » potrzeby w zakresie mocy biernej indukcyjnej na poziomie do 30 kvar (noc) w celu utrzymania warunku $tg\phi < 0,4$,
- » potrzeby w zakresie mocy biernej pojemnościowej na poziomie do 25 kvar (dni ustawowo wolne od pracy) w celu wyeliminowania opłat za moc bierną oddaną.

Tradycyjna kompensacja w tym przypadku, musiałaby być oparta na kondensatorach chronionych dławikami rezonansowymi 7% oraz dławikach kompensacyjnych. Cenowo takie rozwiązanie byłoby zbliżone do kosztu aktywnego kompensatora z funkcją filtra wyższych harmonicznych (ASVG).

Dodatkowo rozwiązanie „tradycyjne” potrzebowałoby znacznie więcej miejsca w pomieszczeniu RG prefabrykowanej stacji transformatorowej. Ze względu na jego brak, istniała nawet koncepcja wyniesienia „tradycyjnego” układu kompensacyjnego poza stację transformatorową (wykonanie zewnętrzne), a to podniosłoby jeszcze bardziej koszty jego wykonania oraz obniżyłoby jego niezawodność.

Literatura

1. K. Herlender, M. Żebrowski, Kompensacja mocy biernej jako jeden z elementów poprawy efektywności energetycznej, „elektro.info” nr 12/2014.
2. Z. Hanzelka, A. Piekarz, Załączanie baterii kondensatorów w sieciach niskiego i średniego napięcia, AGH, Kraków 2000.
3. K. Herlender, M. Żebrowski, Wpływ szybkości komutacji baterii kondensatorów na zawartość wyższych harmonicznych, „elektro.info” nr 7–8/2016.
4. Informacje techniczne zawarte na stronach www.REBUD.pl.

EVER
POWER SYSTEMS

Nie musisz się znać! Wdrożenie zasilania awaryjnego to nasze zadanie



**ZASILACZE
AWARYJNE
UPS**

**AGREGATY
PRĄDOTWÓRCZE**

Zeskanuj kod QR
i sprawdź, co możemy dla Ciebie zrobić.
Znajdź i skorzystaj
ze specjalnych bonusów zakupowych.



DZWOŃ
61 6500 425
660 431 991

zapytanie@ever.eu
www.ever.eu

Sprawdź,
jak to działa

Autor: Piotr Zaremba, Menedżer Produktu IF Phoenix Contact

Efektywność energetyczna przemysłu i przedsiębiorstw – praktyczne aspekty pomiaru i zarządzania energią

W ostatnich latach przedsiębiorstwa przemysłowe mierzą się z dynamicznie rosnącymi kosztami energii elektrycznej, coraz bardziej restrykcyjnymi regulacjami środowiskowymi oraz presją na redukcję emisji CO₂. W Polsce przemysł odpowiada za ok. 23% całkowitego zużycia energii, co czyni go kluczowym obszarem do optymalizacji. Wdrażanie systemów pomiarowych i zarządzania energią nie jest już tylko kwestią techniczną, ale strategicznym elementem budowania przewagi konkurencyjnej i spełniania wymogów norm ISO 50001, ESG oraz Dyrektywy UE 2023/1791.

Pomiar energii – fundament efektywności i optymalizacji

Precyzyjny pomiar energii i mocy to podstawa skutecznego zarządzania energią w zakładzie. Dzięki wiarygodnym danym możliwe jest:

Identyfikacja obszarów nadmiernego zużycia energii

Przykład: Analiza pracy linii produkcyjnych pozwala wykryć urządzenia pracujące w trybie jałowym lub z nieoptymalnym obciążeniem. W praktyce, wdrożenie pomiarów umożliwia ograniczenie strat nawet o 10–30%, co przekłada się na realne oszczędności finansowe.

Analiza profili obciążenia w czasie rzeczywistym

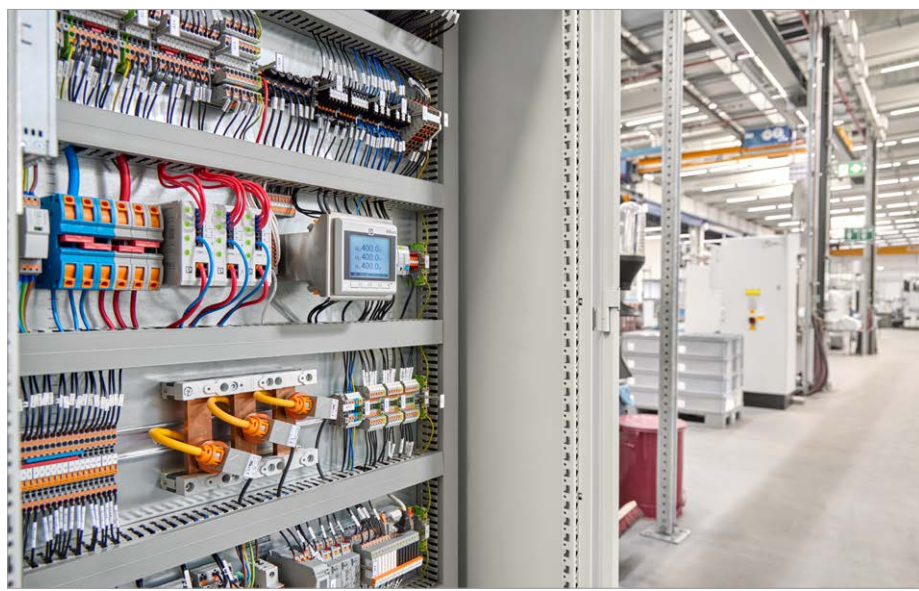
Dzięki monitorowaniu zużycia energii w różnych godzinach i dniach, możliwe jest dostosowanie harmonogramów pracy maszyn do rzeczywistych potrzeb produkcyjnych. Przykład: Przesunięcie energochłonnych procesów na godziny niższych taryf energetycznych.

Wdrażanie strategii redukcji kosztów

Pomiar parametrów takich jak moc bierna, harmoniczne czy współczynnik mocy pozwala na szybkie wykrycie nieprawidłowości i wdrożenie działań korygujących, np. kompensację mocy biernej czy eliminację źródeł zakłóceń.

Poprawa wskaźników OEE (Overall Equipment Effectiveness)

OEE to wskaźnik, który pozwala firmom ocenić, jak efektywnie wykorzystywane są maszyny i linie produkcyjne. Regularna obserwacja OEE umożliwia szybkie wykrywanie strat wynikających z przestojów, spadków wydajności czy produkcji wadliwej. Dzięki temu przedsiębiorstwa mogą skutecznie optymalizować procesy, obniżyć koszty i zwiększać niezawodność produkcji.



Precyzyjny pomiar energii i mocy to podstawa skutecznego zarządzania energią w zakładzie

ny i linie produkcyjne. Regularna obserwacja OEE umożliwia szybkie wykrywanie strat wynikających z przestojów, spadków wydajności czy produkcji wadliwej. Dzięki temu przedsiębiorstwa mogą skutecznie optymalizować procesy, obniżyć koszty i zwiększać niezawodność produkcji.

Technologie pomiarowe i monitorujące – rozwiązania Phoenix Contact

W nowoczesnych zakładach przemysłowych rzetelny pomiar i monitoring energii to podstawa efektywnego zarządzania kosztami oraz niezawodnością procesów. Rozwiązania Phoenix Contact, takie jak mierniki EMpro, są projektowane z myślą o codziennych wyzwaniach inżynierów – pozwalają szybko wdrożyć system pomiarowy, zintegrować go z automatyką zakładową i uzyskać dostęp do kluczowych danych w czasie rzeczywistym. Dzięki wbudowanym interfejsom komunikacyjnym i intuicyjnej konfiguracji, mierniki EMpro sprawdzają się zarówno w nowych, jak i modernizowanych instalacjach.

Najważniejsze korzyści dla użytkownika wynikające z zastosowania mierników EMpro:

- » **Szybka instalacja i konfiguracja** – asystent uruchamiania pozwala na wdrożenie urządzenia w zaledwie trzech krokach, co skraca czas pracy zespołu technicznego.
- » **Bezpośrednie podłączenie cewek Rogowskiego** – uproszczone oprzewodowa-

nie i możliwość pomiaru dużych prądów bez dodatkowych przekładników.

» **Wbudowane interfejsy komunikacyjne** – Modbus/TCP, PROFINET, EtherNet/IP, REST API – umożliwiają łatwą integrację z systemami SCADA, BMS czy platformami IoT.

» **Serwer WWW i funkcje alarmowe** – dostęp do danych pomiarowych, wykresów i konfiguracji z poziomu przeglądarki, bez konieczności instalowania dodatkowego oprogramowania.

» **Bezpośrednia integracja z chmurą Proficloud.io** – umożliwia zdalny dostęp do danych i ich analizę z dowolnego miejsca.

Więcej na [Monitorowanie energii dla skutecznego zarządzania energią | Phoenix Contact](#)

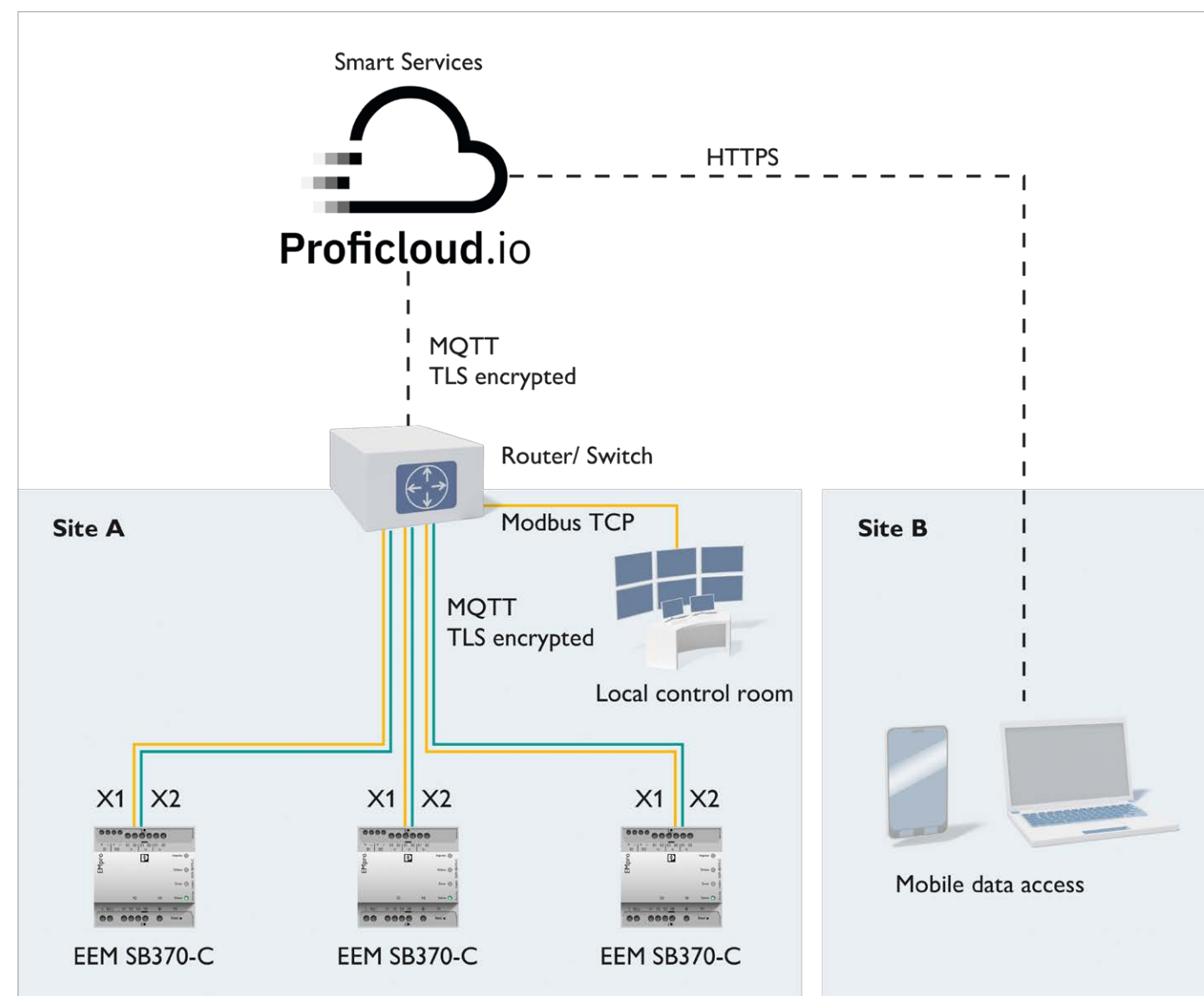
W zakładach produkcyjnych największe korzyści z rozwiązań Phoenix Contact to możliwość bieżącego monitorowania zużycia energii na poziomie linii technologicznych, szybka



Rozwiązania Phoenix Contact, takie jak mierniki EMpro, są projektowane z myślą o codziennych wyzwaniach inżynierów

identyfikacja nieefektywnych procesów oraz ograniczenie kosztów operacyjnych. Precyzyjne pomiary wspierają optymalizację pracy maszyn i procesów oraz pozwalają zapobiegać awariom i lepiej planować działania utrzymania ruchu.

Dodatkowo, mierniki EMpro sprawdzają się także w obiektach biurowych, instalacjach PV czy infrastrukturze ładowania pojazdów, wszędzie tam, gdzie liczy się niezawodność i szybka reakcja na zmiany w zużyciu energii.



Proficloud.io od Phoenix Contact, to nowoczesna platforma umożliwiająca bezpieczne gromadzenie, analizę i zarządzanie danymi pomiarowymi z wielu zakładów jednocześnie

Systemy zarządzania energią (EMS) to rozwiązania, które pozwalają przedsiębiorstwom monitorować, analizować i optymalizować zużycie energii w całym zakładzie. Mierniki Phoenix Contact, takie jak EMpro, pełnią w nich kluczową rolę jako źródło wiarygodnych danych pomiarowych, niezbędnych do oceny efektywności procesów i podejmowania decyzji optymalizacyjnych. Dzięki integracji z EMS możliwe jest automatyczne raportowanie, szybka identyfikacja nieprawidłowości oraz realizacja polityki energetycznej zgodnie z wymaganiami normy ISO 50001. Takie podejście przekłada się na realne korzyści: lepszą kontrolę kosztów, wyższą niezawodność produkcji i możliwość ciągłego doskonalenia efektywności energetycznej.

Więcej na [Oprogramowanie do zarządzania energią | Phoenix Contact](#)

Integracja z chmurą i IoT – Proficloud.io, analityka, cyberbezpieczeństwo

Chmura obliczeniowa, taka jak Proficloud.io od Phoenix Contact, to nowoczesna platforma umożliwiająca bezpieczne gromadzenie, analizę i zarządzanie danymi pomiarowymi z wielu zakładów jednocześnie. Dzięki temu firmy mogą łatwo agregować informacje, analizować trendy oraz prognozować zużycie energii, co wspiera optymalizację procesów i szybkie podejmowanie decyzji.

Bezpieczeństwo danych w chmurze jest priorytetem – Phoenix Contact wdraża zaawanso-

wane mechanizmy szyfrowania, uwierzytelniania oraz zgodność z międzynarodowymi normami, takimi jak IEC 62443. Innowacyjne rozwiązania i wieloletnie doświadczenie w obszarze cyberbezpieczeństwa pozwala skutecznie zabezpieczać sieci OT, a użytkownicy mogą mieć pewność, że ich dane są odpowiednio zabezpieczone przed nieautoryzowanym dostępem czy cyberatakami. W praktyce, dane z mierników są wykorzystywane do bieżącej analizy efektywności energetycznej, identyfikacji obszarów do optymalizacji oraz zapobiegania awariom, co przekłada się na realne oszczędności i większą niezawodność produkcji.

Poradnik cyberbezpieczeństwa: [Misja: bezpieczna sieć OT | Phoenix Contact](#)

Integracja systemów pomiarowych z chmurą przekłada się na wymierne korzyści dla utrzymania ruchu i produkcji: pozwala zredukować zużycie energii nawet o 10–30%, obniżyć koszty utrzymania ruchu dzięki predykcijnym analizom, zwiększyć efektywność operacyjną poprzez automatyzację raportowania oraz lepiej planować inwestycje na podstawie danych historycznych i prognoz.

Przykład realizacji: [System zarządzania energią MINT | Phoenix Contact](#)

Rynek systemów zarządzania energią (EMS) w Europie dynamicznie rośnie – według prognoz MarketsandMarkets jego wartość przekroczy 84 mld USD do 2029 roku, przy średnim rocznym wzroście na poziomie ponad 13%. Coraz większy udział mają rozwiązania opar-

te na chmurze, a do 2030 roku mogą stanowić ponad 60% wdrożeń. Kluczowe trendy to automatyzacja procesów, integracja z systemami MES, wykorzystanie sztucznej inteligencji do predykcji zużycia energii oraz rosnące znaczenie cyberbezpieczeństwa i transparentności danych w kontekście regulacji ESG. Przedsiębiorstwa stoją przed wyzwaniami związanymi z rosnącymi kosztami energii, koniecznością redukcji emisji i wdrażaniem nowych technologii, ale jednocześnie mają szansę na zwiększenie efektywności, lepsze planowanie inwestycji i budowanie przewagi konkurencyjnej. Phoenix Contact aktywnie odpowiada na te potrzeby, rozwijając innowacyjne rozwiązania pomiarowe i wspierając klientów w bezpiecznym, zrównoważonym zarządzaniu energią – otwierając się na nowe możliwości, jakie niesie Przemysł 4.0. Źródło: [MarketsandMarkets – Energy Management Systems Market](#)



Phoenix Contact Sp. z o.o.
51-317 Wrocław, ul. Bierutowska 57-59
Budynek nr 3/A
tel. 71 39 80 410
www.phoenixcontact.pl



Phoenix Contact rozwija innowacyjne rozwiązania pomiarowe i wspiera klientów w zrównoważonym zarządzaniu energią

NOWOŚĆ!

Julian Wiatr

Metodyka zasilania urządzeń przeciwpożarowych w energię elektryczną

oraz dopuszczanie wyrobów budowlanych w ochronie przeciwpożarowej

Wybrane zagadnienia

Julian Wiatr

Metodyka zasilania urządzeń przeciwpożarowych w energię elektryczną oraz dopuszczanie wyrobów budowlanych w ochronie przeciwpożarowej

Zasilanie urządzeń elektrycznych w czasie pożaru to zagadnienie, które w równej mierze dotyczy zarówno strażaków, jak i elektryków. Często w praktyce pojawiają się problemy z interpretacją niektórych przepisów zawartych w normach i rozporządzeniach. Najnowsza publikacja opisuje wybrane zagadnienia, które wymagają szerszego wyjaśnienia i mogą być przydatne strażakom i elektrykom w ich praktyce projektowej.

Materiały uzupełniające obejmują dodatki i załączniki dotyczące: ochrony przeciwporażeniowej w sieci o układzie zasilania IT, badania stanu technicznego instalacji elektrycznych niskiego napięcia, ochrony sprzętu i urządzeń elektrycznych przez obudowy, kodowania barwami elementów manipulacyjnych czy zabezpieczenia instalacji elektrycznych niskiego napięcia od skutków zwarć łukowych.

To kompendium wiedzy dla strażaków i elektryków, które pozwoli zoptymalizować wybrane elementy procesu projektowania instalacji elektrycznych, które muszą pracować w czasie pożaru. Cennym uzupełnieniem książki są liczne przykłady rachunkowe oraz rysunki ilustrujące opisywane zagadnienia.

Publikacja pod patronatem miesięcznika

elektro
info

zamówienia: www.ksiegarniatechniczna.com.pl

Jakość kompensacji mocy biernej

w aspekcie utrzymania wartości współczynnika mocy

Ze względów ekonomicznych i technicznych ważnym elementem pozostaje utrzymanie właściwego bilansu mocy biernej. Bilans ten może być wyrażony przez wykorzystanie wielkości w postaci współczynnika mocy $\cos \varphi$. Zapewnienie właściwej wartości tego współczynnika pozwala spełnić wymagania stawiane przed służbami utrzymania ruchu.

Współczynnik mocy jako parametr kompensacji mocy biernej

Jednym z elementów Jakości Energii Elektrycznej (JEE) w zakładzie przemysłowym jest prawidłowa gospodarka mocą bierną. Przesył mocy biernej przez elementy układu zasilającego prowadzi m.in. do następujących konsekwencji:

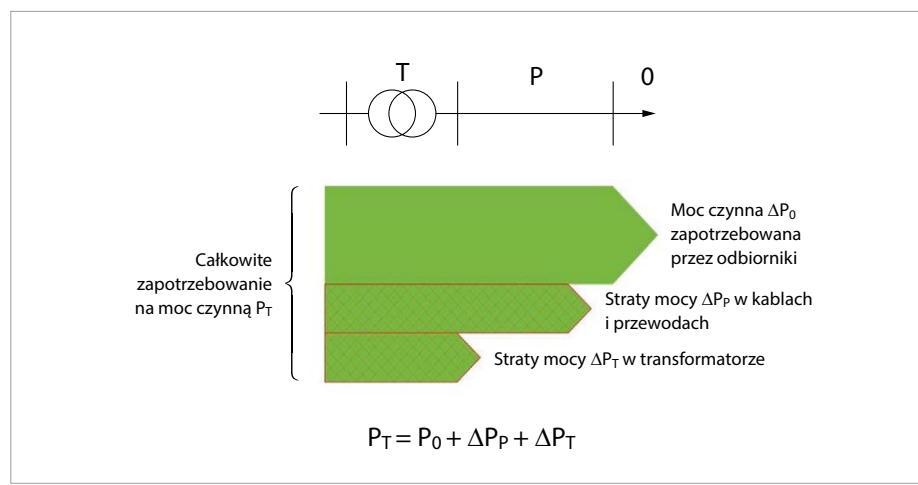
1. zmniejsza dopuszczalną obciążalność mocą czynną,
2. zwiększa straty mocy czynnej ΔP ,
3. wywołuje straty mocy biernej ΔQ ,
4. zwiększa spadki napięcia ΔU ,
5. prowadzi do pojawienia się wahań napięcia, związanych z dynamicznymi zmianami poboru mocy biernej [1].

Rozpływ mocy czynnej w zakładzie przemysłowym i wywołane z tego tytułu straty mocy pokazano na **rysunku 1**. Zapotrzebowanie na moc czynną P_0 przez odbiorniki energii elektrycznej zależne jest od ich mocy znamionowej oraz reżimu ich pracy. Przesył mocy P_0 generuje straty mocy w przewodach, kablach czy przewodach szynowych, a także w transformatorze zasilającym. Obniżenie mocy zapotrzebowanej jest możliwe tylko przez zmianę samego procesu technologicznego, co jest raczej niemożliwe bez znacznych nakładów inwestycyjnych. Ograniczenie strat przesyłowych możliwe jest przez

STRESZCZENIE

Ze względów ekonomicznych i technicznych ważnym elementem pozostaje utrzymanie właściwego bilansu mocy biernej. Bilans ten może być wyrażony przez wykorzystanie wielkości w postaci współczynnika mocy $\cos \varphi$. Zapewnienie właściwej wartości tego współczynnika pozwala spełnić wymagania stawiane przed służbami utrzymania ruchu. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów mocy biernej w układzie, gdzie do kompensacji mocy biernej wykorzystywany jest Statyczny Generator Mocy Biernej.

Słowa kluczowe: kompensacja mocy, współczynnik mocy, SVG.



Rys. 1. Rozpływ mocy czynnej i strat mocy w zakładzie przemysłowym rys. A. Książkiewicz

wymianę elementów na takie o większych przekrojach lub ewentualnie wymianę transformatora na jednostkę o większej mocy. Rozwiązania te również wiążą się z wysokimi nakładami finansowymi, przerwą w produkcji i nie gwarantują uzyskania oszczędności.

Optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie kompensacji mocy biernej. Rozwiązanie to pozwala na generację zapotrzebowanej mocy biernej w miejscu jej wykorzystania. Prowadzi to do odciążenia układu zasilającego, zmniejszenia strat mocy czynnej i biernej oraz redukcji spadków napięcia, dzięki czemu następuje ogólna poprawa parametrów energii elektrycznej w zakładzie. Kompensacja mocy biernej pozwala również na uzyskanie korzyści ekonomicznych [2].

Jednym z parametrów wykorzystywanych do oceny zapotrzebowania na moc bierną jest współczynnik mocy $\cos \varphi$. Jego wartość wyznaczana jest zgodnie ze wzorem:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1)$$

gdzie:

P – zapotrzebowanie na moc czynną, w [W],

S – moc pozorna układu, w [VA].

Ze względu na obecność wyższych harmonicznych prądu i napięcia w przemyśle, powyższe wartości należy odnosić do składowych częstotliwości podstawowej 50 Hz. Z tego powodu zamiast mocy S wprowadza się oznaczenie S_1 (**rys. 2**). Przy wartości współczynnika równej jedności brak jest mocy biernej składowej podstawowej harmonicznej 50 Hz Q_V . Z uwagi na wymagania rozporządzenia [3] dopuszczalny poziom jego wartości wynosi 0,928, co odpowiada w przybliżeniu wartości $\tan \varphi = 0,4$.

Statyczne generatory mocy biernej SVG

Statyczne generatory mocy biernej SVG (Static Var Generator, **fort. 1.**) pozwalają na realizację kompensacji mocy przy występowaniu następujących warunków:

- » szybkich zmian zapotrzebowania na moc bierną,
- » częstych zmian wartości zapotrzebowanej mocy,
- » naprzemiennego zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową i indukcyjną,

» asymetrycznego zapotrzebowania na moc bierną.

Ze względu na brak elementów elektromechanicznych w postaci styczników wykazują wydłużoną żywotność w porównaniu do klasycznych układów kompensacji, w kontekście liczby i częstotliwości przełączeń. Realizują kompensację w układach z asymetrycznym obciążeniem. Dzięki nadążnemu procesowi regulacji możliwa jest kompensacja przy szybkich zmianach zapotrzebowania na moc bierną, z czasem odpowiedzi przeważnie nie dłuższym niż 20 ms.

Analiza przypadku długotrwałej pracy układu kompensacyjnego

Przeprowadzono próby kompensacji mocy biernej w obiekcie o charakterze biurowym. Kompensacja realizowana była poprzez układ o prądzie znamionowym 50 A, pomiar prądu realizowany był poprzez przekładniki prądowe o przekładni 80/5 i klasie 0,2 s. Pomiar jakości kompensacji realizowany był z wykorzystaniem stacjonarnego analizatora jakości energii elektrycznej typu PQI-DA Smart firmy A-Eberle. Nastawiony interwał pomiarowy wynosił 10 minut. Pomiary przeprowadzono podczas normalnej pracy obiektu przez około 3 miesiące. Wykonano próby dla nastawy współczynnika mocy wynoszącego 0,995. Opcje kompensacji wyższych harmonicznych oraz symetryzacji obciążenia były załączone.

Na **rysunku 3**, przedstawiono wykres zmian wartości mocy czynnej, biernej składowej podstawowej 50 Hz i współczynnika mocy dla całego rozpatrywanego przedziału czasu pomiarowego. Przedstawione moce czynne i bierne stanowią sumę składowych dla poszczególnych faz. Wartość współczynnika mocy $\cos \varphi$ odnosi się do wypadkowej wartości dla przed-

stawionego wykresu. Można zaobserwować na przedstawionym wykresie cykliczny charakter pracy obiektu, z wyraźnie zaznaczonymi pięcioma dniami pracy oraz dwudniową przerwą. Zapotrzebowanie na moc czynną osiąga pułap ok. 25 kW przy mocy biernej nieprzekraczającej 1,5 kVAR. Wartość współczynnika mocy utrzymuje się w przedziale od 0,998 do 1,000, przy nastawionej wartości 0,995. Widoczne są tylko pojedyncze punkty pomiarowe, dla których wartość współczynnika ulegał wahaniom, przy niewielkiej jej zmienności, co przy tak długim czasie trwania pomiarów należy uznać za bardzo dobry wynik. Długotrwałe właściwości układu kompensacyjnego pozwalają zapewnić wymagania stawiane w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [3] oraz Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 6 marca 2019 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną [4]. Wymagania te odnoszą się zarówno do poziomu dopuszczalnej wartości współczynnika $\tan \varphi$, jak i sposobu pomiarów tego współczynnika do celów rozliczeniowych.

Na **rysunku 4**, przedstawiono wykres zmian wartości mocy czynnej, biernej składowej podstawowej 50 Hz i współczynnika mocy dla pojedynczego, wybranego tygodnia pracy. Sytuacja przedstawia się analogicznie do poprzedniego przypadku. Wyraźniej zaznaczone są przedziały pracy odbiorcy, gdzie występują krótkotrwałe i względnie znaczne wzrosty obciążenia do mocy ok. 25 kW z poziomu ok. 15 kW. Wypadkowa wartość współczynnika mocy $\cos \varphi$ utrzymuje się na poziomie ok. 0,999.

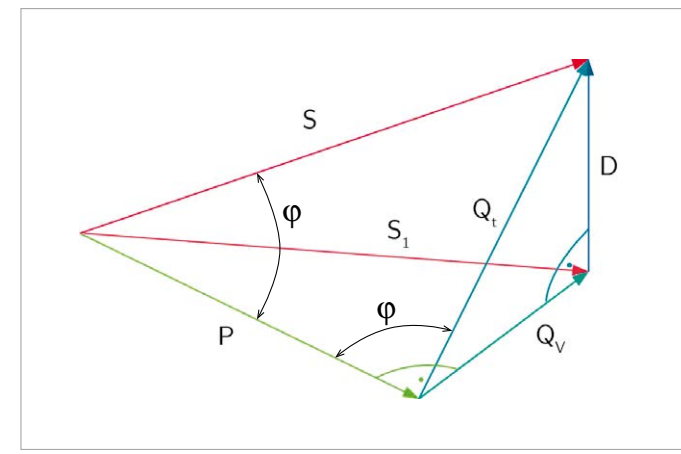
Na **rysunku 5**, przedstawiono wykres zmian wartości mocy czynnej, biernej składowej pod-

stawowej 50 Hz i współczynnika mocy dla pojedynczego, wybranego dnia pracy. Tutaj wyraźnie zaznaczone są przedziały pracy odbiornika lub grupy odbiorników, pracującego w określonych cyklach. Widać również, że czas pracy obiektu przypada na godziny 8:00–16:00. Na szczególną uwagę zasługuje zmienność wartości współczynnika $\cos \varphi$ podczas tych cyklicznych zmian mocy czynnej. Ich zmianom towarzyszą zmiany mocy biernej, tak aby ostatecznie współczynnik mocy pozostał niezmiennie na wymaganym poziomie. Kolejnym elementem jest utrzymywanie wymaganego poziomu kompensacji zarówno przy wysokich, jak i niskich obciążeniach. Obniżone zapotrzebowanie na moc występuje poza godzinami pracy obiektu, czyli w godzinach późnopołudniowych i nocnych oraz w dni wolne od pracy. Urządzenia SVG pozwalają na utrzymanie wymaganego poziomu wartości $\cos \varphi$ przy dużym poziomie zmienności mocy zapotrzebowanej przez odbiorcę.

Głębsze spojrzenie na ten sam odcinek czasu przedstawiono na **rysunku 6**, gdzie pokazano te same wielkości co na **rysunku 5**, ale z podziałem na poszczególne fazy. Na tej podstawie można stwierdzić, że nie tylko wymagany poziom kompensacji jest utrzymywany dla całego układu, ale również dla każdej z faz niezależnie. Co więcej, widoczne są efekty pracy układu w zakresie symetryzacji obciążenia, gdzie różnice pomiędzy poszczególnymi fazami, zarówno w zakresie mocy czynnej, jak i biernej, są znikome.

I Podsumowanie

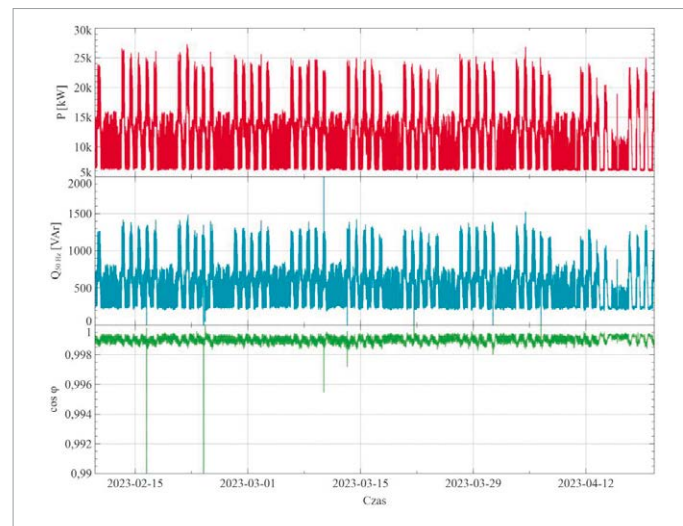
Zagadnienie bilansu mocy biernej pozostaje cały czas ważnym punktem dla służb utrzymania ruchu elektrycznego, zarówno z powodów technicznych, jak i ekonomicznych. Jedną z miar



Rys. 2. Prostokąt mocy: P – moc czynna, w [W]; Q_V – moc bierna składowej podstawowej harmonicznej, w [VAR]; D – moc dystorsji, w [VAR]; Q_I – moc bierna całkowita, w [VAR]; S – moc pozorna, w [VA]; S_1 – moc pozorna składowej podstawowej harmonicznej, w [VA] rys. A. Książkiewicz



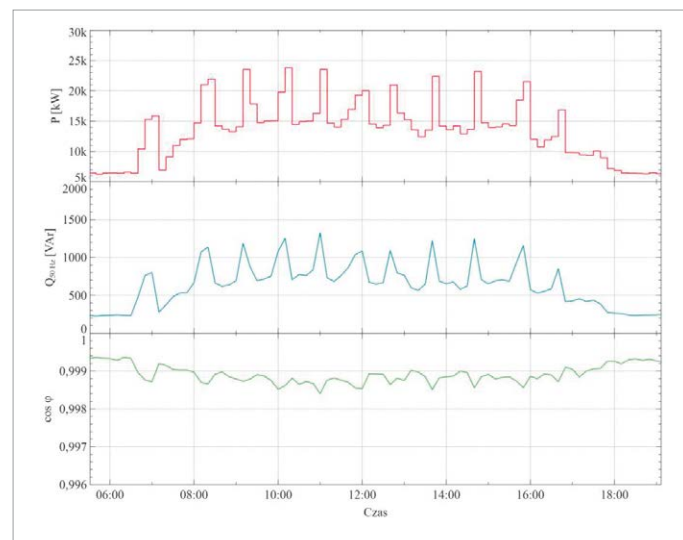
Fot. 1. Widok kompensatora mocy biernej ASTec fot. A. Książkiewicz



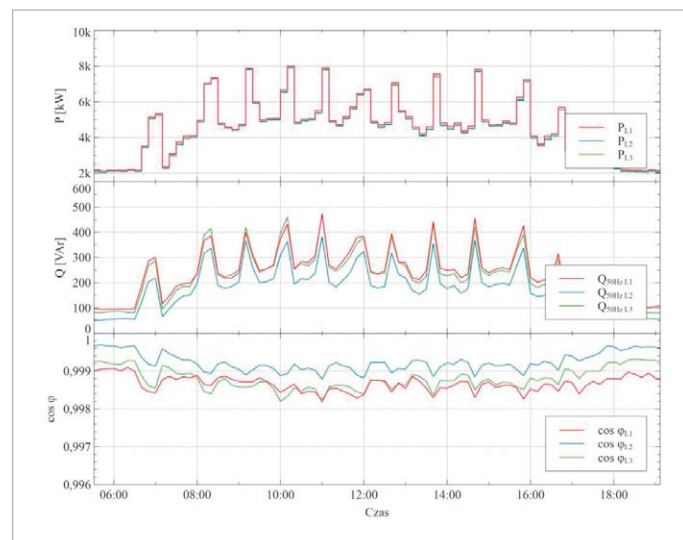
Rys. 3. Wykres zmian wartości mocy czynnej, biernej składowej podstawowej 50 Hz i współczynnika mocy dla długoterminowego pomiaru
rys. A. Książkiewicz



Rys. 4. Wykres zmian wartości mocy czynnej, biernej składowej podstawowej 50 Hz i współczynnika mocy dla pojedynczego, wybranego tygodnia pracy
rys. A. Książkiewicz



Rys. 5. Wykres zmian wartości mocy czynnej, biernej składowej podstawowej 50 Hz i współczynnika mocy dla pojedynczego, wybranego dnia pracy
rys. A. Książkiewicz



Rys. 6. Wykres zmian wartości mocy czynnej, biernej składowej podstawowej 50 Hz i współczynnika mocy dla pojedynczego, wybranego dnia pracy; podział na poszczególne fazy
rys. A. Książkiewicz

wykorzystywanych do oceny prawidłowego bilansu jest współczynnik mocy $\cos \varphi$. Utrzymanie właściwej jego wartości pozwala spełnić wymagania stawiane w Rozporządzeniach [3, 4]. Jednym ze sposobów zapewnienia właściwej gospodarki mocy bierniej jest stosowanie układów kompensacji mocy bierniej w postaci Statycznych Generatorów Mocy Bierniej SVG. Zastosowanie tych układów pozwala na uzyskanie właściwej kompensacji mocy bierniej i wysokich wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$, zgodnych z oczekiwaniami. Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów wykazano utrzymanie stałego poziomu $\cos \varphi$ w całym przedziale pomiarowym, dla każdej z faz niezależnie. Utrzymanie poziomu kompensacji w trybie nadążnym widoczne jest również w chwilach zmian zapotrzebowania na moc czynną i bierną. Dzięki

ki pracy układu w trybie symetryzacji faz można również zaobserwować wysoki poziom równomierności obciążenia.

I Literatura

1. S. Kujszczyk, Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
2. K. Habelok, M. Stępień, Analiza wpływu kompensacji mocy bierniej na wysokość opłat za energię elektryczną na przykładzie hali sportowej, „Przegląd Elektrotechniczny”, 93(10)/2017, s. 158–161.
3. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2007 nr 93 poz. 623 z późn. zm.).

4. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 6 marca 2019 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną (Dz.U. 2019 poz. 503 z późn. zm.).

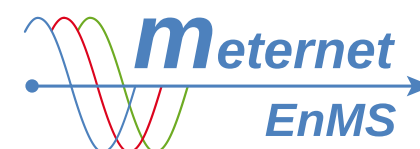
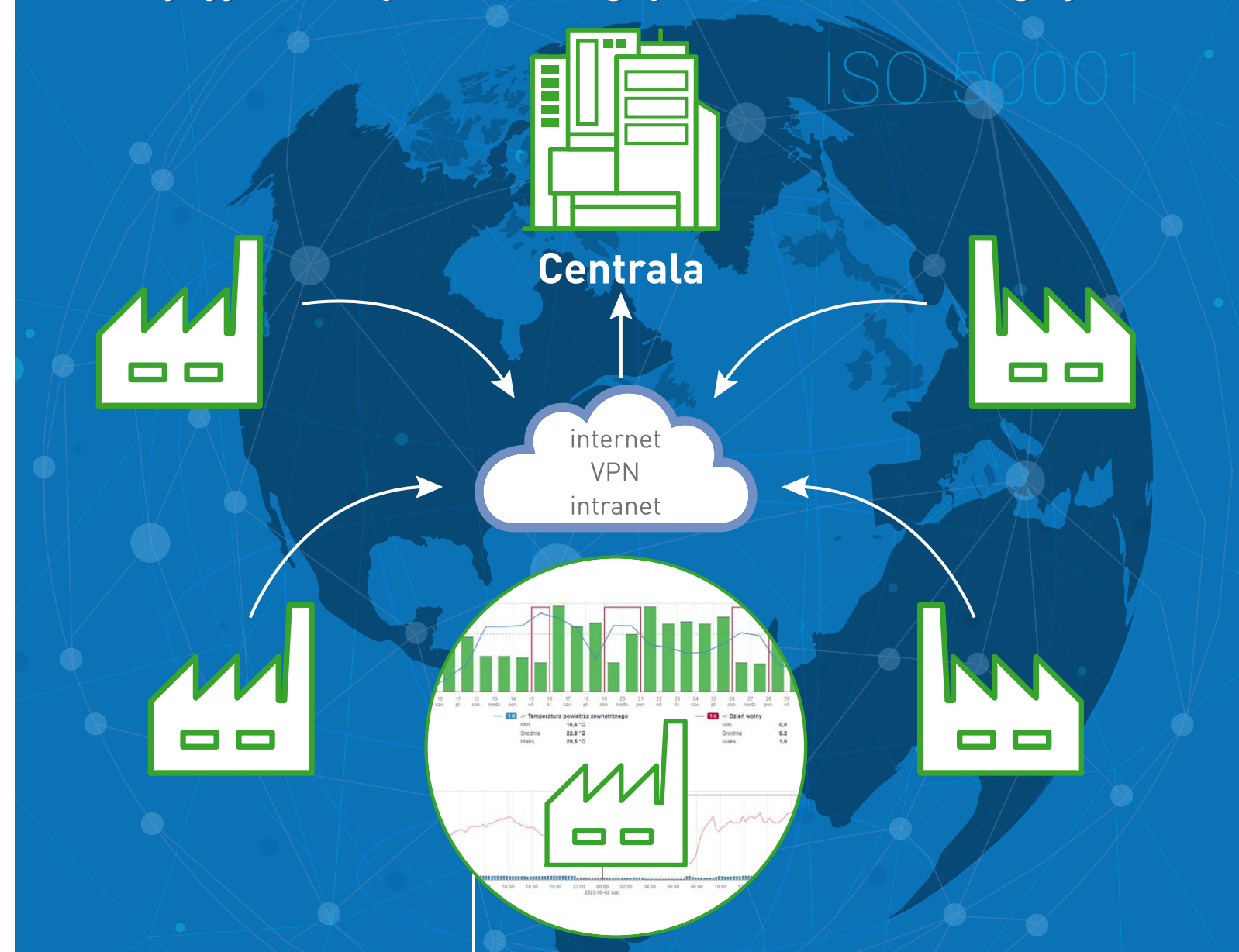
ABSTRACT

Quality of reactive power compensation in terms of maintaining power factor values

For economic and technical reasons, it remains important to maintain a proper reactive power balance. This balance can be expressed by using a quantity in the form of power factor $\cos \varphi$. Ensuring the correct value of this coefficient allows you to meet the requirements for maintenance services. The article presents the results of reactive power measurements in a system where a Static Reactive Power Generator is used to compensate for reactive power.

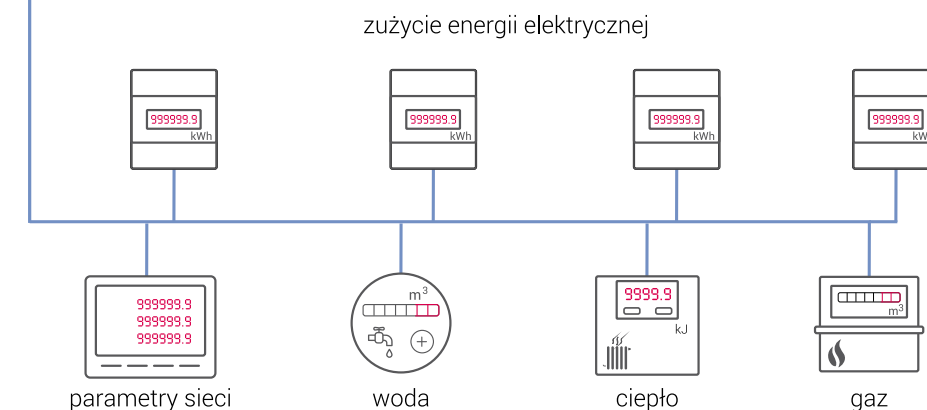
Keywords: power compensation, power factor, SVG.

Precyzyjne zarządzanie energią dla zrównoważonego jutra



ENERGY MANAGEMENT SYSTEM

- > system klasy Energy Management System – zarządzanie energią
- > narzędzie wspierające proces wdrożeń ISO 50001 – poprawa efektywności energetycznej
- > system „chmurowy” do układów rozproszonych (duża liczba lokalizacji)
- > szybka i wydajna baza danych SQL
- > otwarta baza SQL - dostępna dla wszystkich programów bazodanowych użytkownika
- > innowacyjne urządzenia komunikacyjne/sterowniki IoT MT-SAT
- > komunikacja internetowa MQTT – szybki i „lekki” protokół komunikacyjny dla urządzeń systemów IoT



Zagrożenia pożarowe stwarzane przez układy kompensacji mocy biernej (część 1.)

Kompensacja mocy biernej jest wymagana w przepisach i rozporządzeniach rządowych jako przedsięwzięcie związane między innymi z poprawą efektywności energetycznej. W praktycznych rozwiązaniach można spotkać różne elementy kompensacji mocy biernej w zależności od wymagań, jakie powinny spełniać w sieciach elektroenergetycznych i instalacjach elektrycznych. Można wyróżnić następujące elementy kompensacji mocy biernej:

- » baterie kondensatorów energetycznych do kompensacji mocy biernej indukcyjnej,
- » baterie dławików kompensacyjnych do kompensacji mocy biernej pojemnościowej,
- » filtry aktywne wyższych harmonicznnych z możliwością kompensacji mocy biernej odkształconej.

Kompensację mocy biernej stosuje się zarówno w sieciach przesyłowych, rozdzielczych, jak i w instalacjach elektrycznych dużych i małych zakładów przemysłowych oraz u innych odbiorców energii elektrycznej, ta-

kich jak budynki użyteczności publicznej (urzędy, szkoły itp.), galerie handlowe (centra handlowe), sklepy wielkopowierzchniowe, małe sklepy osiedlowe i inne.

Kompensacja mocy biernej jest też wymagana ze względów czysto inżynierskich, jako działanie mające ograniczyć straty związane z przesyłem mocy oraz straty związane z produkcją mocy biernej przez urządzenia wytwórcze.

W wyniku prawidłowo zaprojektowanych układów kompensacji mocy biernej uzyskuje się ograniczenie prądu pobieranego z sieci oraz utrzymuje właściwą wartość kąta ϕ między prądem a napięciem, co w efekcie ogranicza spadek napięcia w sieci zasilającej, poprawia jakość napięcia zasilającego oraz zwiększa przepustowość sieci.

Skoro urządzenia do kompensacji mocy biernej muszą i będą występować praktycznie we wszystkich typach instalacji (sieciach) elektrycznych, to analiza ich działania pod kątem ewentualnego zagrożenia pożarowego jest uzasadniona.



Rys. 1. Widok przykładowego regulatora rys. LOVATO Electric

Podstawowe elementy układów kompensacji

W celu przeanalizowania zagrożeń pożarowych, jakie mogą stwarzać układy kompensacji mocy biernej oraz wskazania metod ich neutralizacji, poniżej zestawiono najczęściej występujące komponenty, dwóch najczęściej występujących układów kompensacji:

Układ kompensacji mocy biernej indukcyjnej (baterie kondensatorów):

- » element sterujący – regulator,
- » element łączeniowy (komutator) – stycznik do załączania kondensatorów, najczęściej z tzw. miękkim załączeniem, lub przełącznik tyrystorowy,
- » element wykonawczy – kondensator lub zestaw: kondensator i dławik ochronny (rezonansowy),
- » elementy rozładownicze,
- » elementy zasilające i połączeniowe – przewody, zabezpieczenie,
- » obudowa z wentylacją mechaniczną lub grawitacyjną.

Układ kompensacji mocy biernej pojemnościowej (bateria dławików kompensacyjnych):

- » element sterujący – regulator,
- » element łączeniowy (komutator) – stycznik do załączania dławików lub przełącznik tyrystorowy,
- » element wykonawczy – dławik kompensacyjny lub zestaw dławików kompensacyjnych,
- » elementy zasilające połączeniowe – przewody, zabezpieczenie,
- » obudowa z wentylacją mechaniczną lub grawitacyjną.

Przykładowe elementy układów kompensacyjnych pokazano na zamieszczonych powyżej rysunkach. I tak: na **rysunku 1.** pokazano widok przykładowego regulatora (DCR88 – LOVATO), na **rysunku 2.** pokazano widok przykładowej baterii kondensatorów ze stycznikami z miękkim startem (ORTEA – ITALIA), na **rysunku 3.**

pokazano widok przykładowej baterii kondensatorów z dławikami ochronnymi, stopnie załączane tyrystorowo (REBUD Nowa Sól), a na **rysunku 4.** pokazano widok przykładowej baterii dławików kompensacyjnych (REBUD Nowa Sól).

Najczęściej spotykane awarie poszczególnych elementów kompensacyjnych mogących wywołać pożar oraz ewentualne powody ich występowania

Poniżej opisano najczęściej spotykane awarie, występujące w poszczególnych elementach układów kompensacyjnych, takich jak: regulator, stycznik, kondensator, element rozładowniczy, przewody oraz ich zabezpieczenia, obudowy układów kompensacyjnych, które mogą wywołać pożar (być jego źródłem).

I Element sterujący – regulator

Głównym zadaniem regulatora w układzie kompensacyjnym jest wyznaczenie wielkości załączanych stopni w celu osiągnięcia zamierzonego celu kompensacyjnego (uzyskania wymaganej wartości $\cos\phi$). Sam w sobie regulator nie stanowi wielkiego zagrożenia pożarowego, ale jego niewłaściwa praca, czyli np. złe dobranie parametrów – nastawy lub typ regulatora mogą prowadzić do zwiększenia awaryjności poszczególnych elementów układu kompensacyjnego.

Przykładem może tu być np. parametr związany z czasem rozładowania kondensatora po wykonaniu cyklu pracy. Zbyt krótki czas rozładowania, nie-



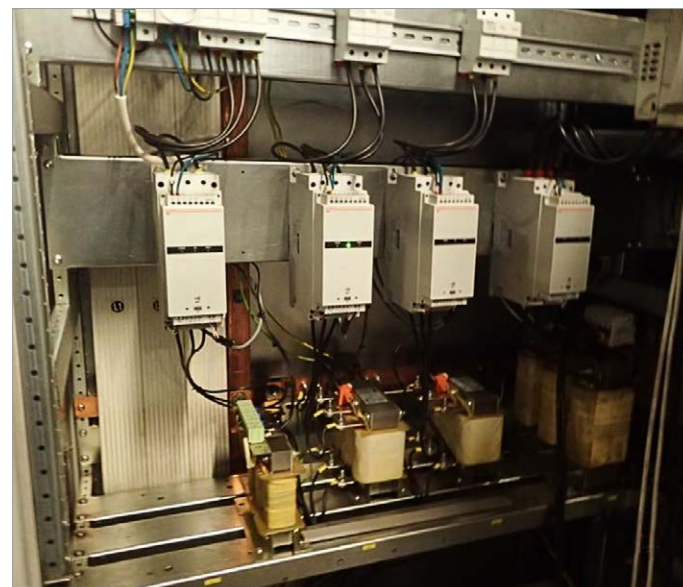
Rys. 4. Przykładowa automatyczna bateria dławików kompensacyjnych rys. M. Żebrowski



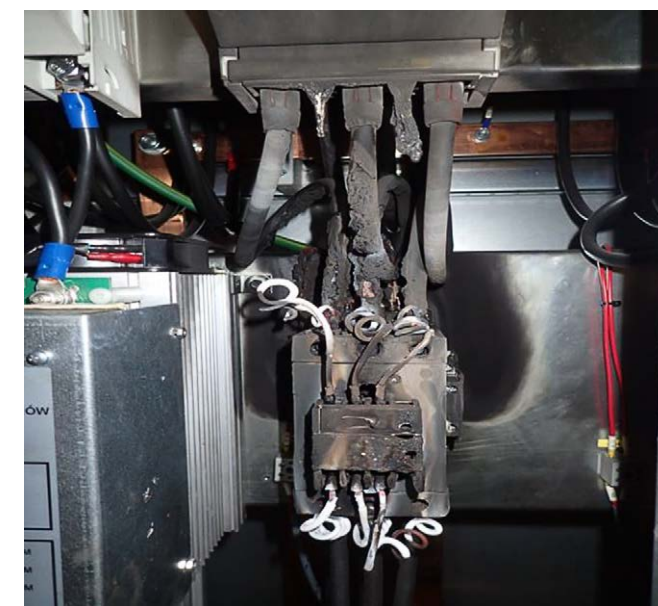
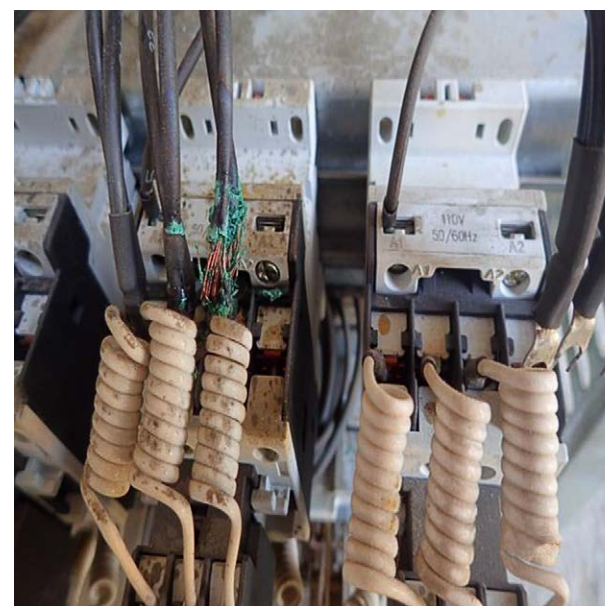
Rys. 5. Widok uszkodzonego regulatora – brak zasilania rys. M. Żebrowski



Rys. 2. Widok przykładowej małej baterii kondensatorów serii MICROMATIC HP20 na potrzeby sklepu rys. M. Żebrowski



Rys. 3. Widok przykładowej baterii kondensatorów z dławikami ochronnymi (stopnie załączane tyrystorowo) rys. M. Żebrowski



Rys. 6. Widok najczęściej spotykanych uszkodzeń stycznika z miękkim startem rys. M. Żebrowski



Rys. 7. Widok uszkodzonego kondensatora
rys. M. Żebrowski

rametrów krytycznych (czas pracy, liczba wykonanych cykli łączeniowych itp.) oraz różnego rodzaju alarmów mających na celu ograniczenie uszkodzeń występujących w kompensatorze.

Element załączający (komutacyjny) – stycznik

Stycznik, a w szczególności stycznik z tzw. miękkim startem, jest najbardziej popularnym sposobem załączania stopni kompensacyjnych kondensatorowych. Ze względu na specyfikę pracy (duża liczba wykonywanych cykli, gdzie maksymalna liczba cykli zalecana przez producenta waha się od 250 000 do 350 000), średnio skomplikowane podłączenie przewodów zasilających dużą liczbę współpracujących ze sobą elementów, w tym elementów wykonanych z materiałów typu PCV, stycznik jest elementem narażonym na uszkodzenia mechaniczne i elektryczne. Uszkodzenie mechaniczne może powodować wystąpienie zjawisk niekorzystnych dla poprawnej pracy stycznika: zablokowanie styków głównych, zablokowanie styków pomocniczych, uszkodzenie tzw. miękkiego startu (w niektórych wypadkach nawet jego zapłon).

Styczniki należy instalować w układach kompensacji ściśle według zaleceń producenta (tabliczka znamionowa stycznika) zarówno w przypadku załączania stopni kondensatorowych, jak i dławikowych.

Elementy kompensujące (wykonawcze) – kondensator z elementem rozładowczym

Ze względu na specyfikę współpracy kondensatora wyposażonego w element rozła-

dowczy z pozostałymi elementami kompensatora, jego poprawne działanie w układzie zależy między innymi od:

- » poprawnej pracy kontrolera – regulatora,
- » średniego czasu życia kondensatora, który waha się od 8 do 10 lat,
- » jakości napięcia zasilającego – przepięcia,
- » zawartości THDU i THDI_C,
- » temperatury otoczenia (w podwyższonej temperaturze procesy starzeniowe w kondensatorze zachodzą znacznie szybciej niż w temperaturze zalecanej przez producenta, która najczęściej waha się od –20 do 50°C).

Element rozładowczy musi być poprawnie dobrany do efektu, jaki chcemy uzyskać w przypadku naszego kompensatora. Standardowo są to rezystory rozładowcze o $R = 330 \text{ k}\Omega/\text{fazę}$, o mocy minimum 3 W, które sprowadzają napięcie na zaciskach kondensatora do poziomu 50 V w czasie 60–100 s. Zalecany czas rozładowania dla kondensatorów jednofazowych to 60 s, a dla kondensatorów trójfazowych – 120 s.

Elementy połączeniowe (przewody) oraz ich zabezpieczenia

Zabezpieczenia przy bateriach kondensatorów podlegają ostrzejszym narażeniom napięciowym i prądowym niż w wielu innych elementach obwodów. Dlatego bezpieczniki należy stosować na napięcia:

- » 500 V w urządzeniach 400 V,
- » 690 V w urządzeniach 500 V,
- » 1000 V w urządzeniach 690 V,

a dobór prądu bezpieczników należy przeprowadzać zgodnie z poniższą zależnością:

$$I_{nb} \geq (1,5 \div 1,8) \cdot I_{nk}$$

$$I_{nk} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{Q_K}{U_N}$$

gdzie:

Q_K – moc stopnia lub baterii kondensatorów, w [kvar],
 U_N – napięcie znamionowe sieci, w [kV],
 I_{nb} – prąd znamionowy zabezpieczenia, w [A],
 I_{nk} – prąd znamionowy kompensatora, współczynnik 1,5 – dla pojedynczych członów, współczynnik 1,8 – dla baterii wielocłonowej, w przypadku załączania członów powyżej 100 kvar, wartość współczynnika bezpiecznie jest przyjmować nawet na poziomie 2,2.

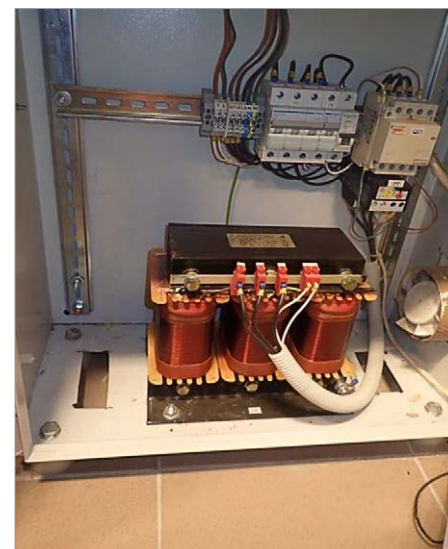
Obudowy układów kompensacyjnych

Standardowa obudowa do układów kompensacyjnych powinna charakteryzować się właściwą kubaturą, mocną konstrukcją, odporną na ewentualne sytuacje zwarciowe wewnątrz obudowy, oraz właściwą wentylacją, która zapewni temperaturę wewnątrz kompensatora niepowodującą zadziałania alar-

mów temperaturowych. Oczywiście szczelność obudowy kompensatora (IP) zależy od warunków zewnętrznych.

Literatura

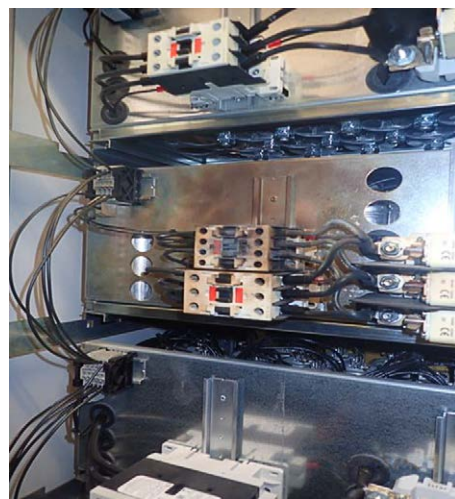
1. Ustawa o efektywności energetycznej z dnia 15 kwietnia 2011 r. (Dz.U. nr 94, poz. 551, z późn. zm.).
2. Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (Dz.U. poz. 831).
3. K. Herlender, M. Żebrowski, Kompensacja mocy biernej jako jeden z elementów poprawy efektywności energetycznej, „elektro.info” nr 12/2014.
4. Z. Hanzelka, A. Piekarczyk, Załączanie baterii kondensatorów w sieciach niskiego i średniego napięcia, AGH, Kraków 2000.
5. K. Herlender, M. Żebrowski, Wpływ szybkości komutacji baterii kondensatorów na wartość wyższych harmonicznych, „elektro.info” nr 7–8/2016.
6. Informacje techniczne zawarte na stronach www.REBUD.pl.
7. Informacje techniczne zawarte na stronach www.LOVATO.pl.
8. Informacje techniczne zawarte na stronach www.ANIRO.pl.



Rys. 9. Widok uszkodzonej wentylacji w obudowie dławika kompensacyjnego
rys. M. Żebrowski

9. PN-EN 6087161, -2 Kondensatory do równoległej kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym powyżej 1 kV.
10. Norma IEC 60831.
11. PN-EN 61921:2005: Kondensatory energetyczne. Baterie kondensatorów niskiego napięcia do poprawy współczynnika mocy.

REKLAMA



Rys. 8. Przykładowe uszkodzenia elementów zabezpieczających i przewodów zasilających
rys. M. Żebrowski

elektro
info

Profesjonalne szkolenia
dla elektryków online!

Ochrona odgromowa i przepięciowa budynków

Dostępne od ręki o każdej porze i bez względu
na to, gdzie jesteś!

www.kursy.elektro.info.pl

mgr inż. Maciej Żebrowski

Metody neutralizacji zagrożeń pożarowych stwarzane przez układy kompensacji mocy biernej (część 2.)

Najlepszym sposobem neutralizacji zagrożeń pożarowych stwarzanych przez układy kompensacji jest ich właściwe zaprojektowanie i właściwa eksploatacja. Projekt układu kompensacji nie powinien ograniczać się tylko do doboru mocy kompensatora w celu osiągnięcia właściwego efektu kompensacyjnego (np. utrzymanie podstawowego parametru wymaganego przez Spółki Dystrybucyjne, czyli $\text{tg } \varphi < 0,4$). Projekt musi zawierać, oprócz pełnego doboru przewodów zasilających i zabezpieczeń, również analizę charakteru sieci energetycznej, z którą będzie współpracował kompensator (zawartość THDU i THDI_C), wyposażenie rozdzielni, z której będzie zasilany kompensator (zastosowane zabezpieczenie, koordynacja ochrony przepięciowej itp.), miejsce posadowienia kompensatora (lokalizacja) oraz dobór właściwego IP obudowy, pasującego do lokalizacji oraz zapewniającego właściwą wentylację (temperatura wewnątrz obudowy).

Warunki eksploatacji (przeglądy, ich częstotliwość) powinny być dobrane indywidualnie do warunków wynikających z miejsca zainstalowania kompensatora. W środowiskach agresywnych, o mocnym zakurzeniu lub zabrudzeniu, przeglądy należy przeprowadzać częściej (np. co miesiąc), w środowiskach standardowych (np. pomieszczenie rozdzielni) – rzadziej, zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Neutralizacja zagrożeń wprowadzanych przez zastosowany regulator

Dobór regulatora powinien zawierać szczegółową analizę pod kątem jego możliwości regulacyjnych oraz analizę jego roli w układzie pod kątem ochrony kompensatora. Re-

gulator (sterownik) musi zapewniać możliwość nastaw podstawowych parametrów stosowanych do ochrony kompensatora, takich jak: ochrona przed wzrostem napięcia powyżej 10% U_N , ochrona przed harmonicznymi, kontrola temperatury wewnątrz obudowy kompensatora, zliczanie liczby cykli wykonanych przez komutator oraz czas pracy. Dodatkowo regulator powinien mieć możliwość komunikowania się z obsługą poprzez wyświetlanie prostych komunikatów na wyświetlaczu, a sterownik (regulator) powinien zapewniać możliwość komunikowania się z obsługą np. poprzez zainstalowaną kartę GPRS lub współpracować (wystawiać sygnały) z istniejącą siecią monitorującą procesy technologiczne w danym obiekcie (system monitoringu zakładowego).

Neutralizacja zagrożeń wprowadzanych przez urządzenia łączące elementy kompensacyjne

Najmniejsze zagrożenia wprowadzają elementy półprzewodnikowe (tyrystory), ale ze względu na cenę, nie zawsze mogą być stosowane. W przypadku stosowania styczników szczególną uwagę należy zwrócić na ich wielkość (dopasowanie do łączanych elementów kompensacyjnych). Większość producentów w swoich kartach katalogowych podaje konkretne typy urządzeń oraz precyzyjnie określa moc kompensatora lub dławika kompensacyjnego, jakie to urządzenie może łączyć, w sposób niezmniejszający średniej liczby cykli (załączeń), jakie to urządzenie może wykonać. W przypadku styczników dołączania kondensatorów szczególną uwagę należy zwrócić na podłączenie przewodów zasilających oraz elementów tzw. miękkiego startu. Styczniki należy bezwzględnie wymieniać (pomimo ich poprawnego działania) po wykonaniu przez nie liczby cykli zalecanych (gwarantowanych) przez producenta styczników.

Neutralizacja zagrożeń wprowadzanych przez elementy kompensujące, kondensatory lub dławiki kompensacyjne

Kondensatory należy stosować nowe, nieuszkodzone, uznanych firm. W tym przypadku podstawowym kryterium nie może być cena. Dodatkowo kondensator (jego obudowa, naj-



Rys. 2. System wypełniania wnętrza baterii CO₂
rys. M. Żebrowski

lepiej metalowa) powinien zapewniać skuteczne wymuszenie prądu zadziałania bezpiecznika w przypadku jego uszkodzenia (powinien posiadać skuteczne uziemienie). Zabezpieczenia poszczególnych stopni kompensacyjnych powinny być dobrane w sposób właściwy, zalecany przez producenta kompensatora.

Oględziny kondensatorów powinny polegać na sprawdzeniu kształtu kondensatora (brak wybrzuszeń, brak innych uszkodzeń). Przegląd kondensatorów powinien polegać na sprawdzeniu jego parametrów podstawowych (prąd I_N oraz moc Q_N) podczas jego normalnej pracy i porównaniu ich z danymi producenta (+/- 10%). Sprawdzeniu podlega też układ rozładowniczy kondensatora. Do oględzin i przeglądów jako urządzenie pomocnicze należy wykorzystywać kamery termowizyjne lub pirometry oraz analizatory – w celu określenia faktycznej mocy stopnia oraz zawartości THDU i THDI_C występujących na zaciskach kompensatora.

Dławiki kompensacyjne: ze względu na ich specyfikę (naturalna temperatura rdzenia na poziomie 100°C) szczególną uwagę należy zwrócić na właściwe zabezpieczenie termicz-



Rys. 3. System rozprzodzenia CO₂ w baterii kondensatorów
rys. M. Żebrowski

ne zabudowane wewnątrz dławika lub w uzwojeniu oraz właściwą wentylację (krotność wymiany powietrza w obudowie kompensatora).

Neutralizacja zagrożeń wprowadzanych przez elementy połączeniowe

Przewody – co do przekroju – należy stosować zgodnie z instrukcją eksploatacji kompensatora. Zalecana izolacja przewodów w przypadku sieci 400 V to minimum 750 V. Zabezpieczenia poszczególnych członów lub całego kompensatora należy dobierać zgodnie ze wzorem podanym w części 1. artykułu („elektro.info” 12/2022).

Neutralizacja zagrożeń wprowadzanych przez obudowy układów kompensacyjnych

Należy pamiętać, aby IP obudowy było właściwie dobrane do warunków, w jakich musi pracować kompensator, a jego kubatura wraz z zastosowaną wentylacją powinna zapewniać właściwą temperaturę wewnątrz obudowy. Obudowy kompensatorów – w przypadku pomiesz-

czeń o podwyższonych wymogach pożarowych (dodatkowych zagrożeniach) – można dodatkowo wyposażać w system wypełniania obudowy czynnikiem CO₂. Na rysunku 2. przedstawiono przykładowy system wypełniania wnętrza baterii CO₂, a na rysunku 3. – system rozprzodzenia CO₂ w baterii kondensatorów.

Wykonanie dodatkowych uszczelnień obudowy w celu wyeliminowania np. mgły olejowej przedstawiono na rysunkach 4. W tym przypadku jako system wentylacji zastosowano klimatyzację w obiegu zamkniętym, działającą w oparciu o wodę technologiczną.

I Podsumowanie

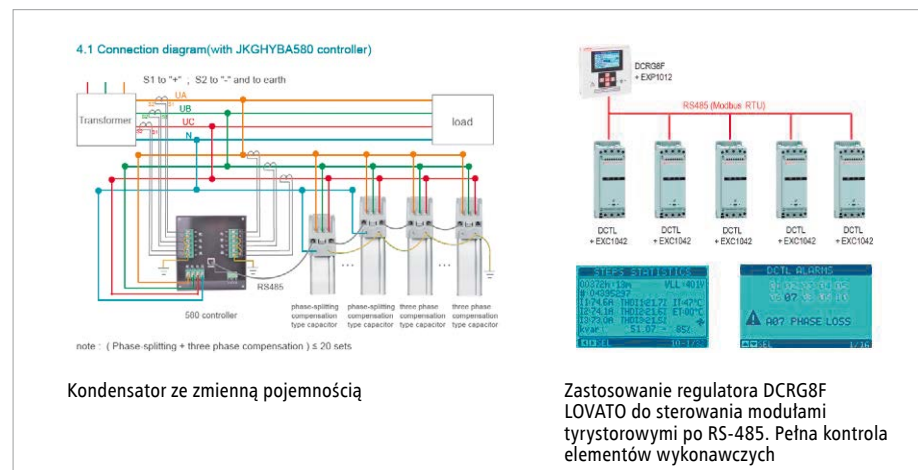
Z przedstawionych w niniejszym opracowaniu analiz oraz załączonych zdjęć wynika, że układy kompensacyjne stanowią zagrożenie pożarowe (mogą być źródłem pożaru) – tak jak większość urządzeń elektrycznych. Tylko właściwe ich zaprojektowanie, montaż, uruchomienie i poprawna eksploatacja mogą zneutralizować zagrożenia, jakie stanowią one podczas eksploatacji w standardowych sieciach elektroenergetycznych.

I Literatura

1. Ustawa o efektywności energetycznej z dnia 15 kwietnia 2011 r. (Dz.U. nr 94, poz. 551, z późn. zm.).
2. Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (Dz.U. poz. 831).
3. K. Herlender, M. Żebrowski, Kompensacja mocy biernej jako jeden z elementów poprawy efektywności energetycznej, „elektro.info” nr 12/2014.
4. Z. Hanzelka, A. Piekarczyk, Załączanie baterii kondensatorów w sieciach niskiego i średniego napięcia, AGH, Kraków 2000.
5. K. Herlender, M. Żebrowski, Wpływ szybkości komutacji baterii kondensatorów na zawartość wyższych harmonicznymi, „elektro.info” nr 7–8/2016.
6. Informacje techniczne zawarte na stronach www.rebud.pl.
7. Informacje techniczne zawarte na stronach www.lovato.pl.
8. Informacje techniczne zawarte na stronach www.aniro.pl.
9. PN-EN 6087161-2 Kondensatory do równoległej kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym powyżej 1 kV.
10. Norma IEC 60831.
11. PN-EN 61921:2005 Kondensatory energetyczne. Bateria kondensatorów niskiego napięcia do poprawy współczynnika mocy.



Rys. 4. Uszczelnienie wentylacji. Zmiana wentylacji na klimatyzację z zamkniętym obiegiem powietrza
rys. M. Żebrowski



Rys. 1. Metody neutralizacji zagrożeń pożarowych wywołanych przez elementy łączące
rys. M. Żebrowski

UPS-y kompensacyjne

Nowa generacja profesjonalnych urządzeń zasilania bezprzerwowego produkcji Benning

Urządzenia zasilania bezprzerwowego są niezbędnym elementem układów zasilania wrażliwych odbiorów, procesów technologicznych, zasilania centrów danych i układów automatyki. Środowisko techniczne, w jakim te urządzenia funkcjonują, opisują normy na urządzenia odbierające energię z sieci energetycznej oraz normy i wymagania na sieć zasilającą, w szczególności wymagania na jakość energii elektrycznej dostarczanej przez operatora systemu dystrybucji energii OSD.

Normy na urządzenia zasilające dość precyzyjnie definiują parametry urządzeń i ich oddziaływanie na sieć zasilającą. Wymagania dotyczące jakości dostarczanej energii poza zakresem zmian napięcia i częstotliwości sprowadzają się głównie do jej dostępności.

Na podkreślenie zasługuje fakt, iż zaniki napięcia zasilania na poziomie pojedynczych minut nie są uwzględniane jako parametr obniżający jakość dostarczanej energii elektrycznej przez OSD. Odbiorca może się zatem spodziewać całego szeregu zdarzeń wymuszających na nim stosowanie urządzeń UPS, głównie dla poprawy jakości dostarczanej z sieci energii elektrycznej. Odbiorca musi jednak uważać **nadodatkowy aspekt korzystania z energii elektrycznej**.

Są nim opłaty, a raczej **kary za ponadu-mowny tzw. „pobór mocy biernej”**, związany z przekroczeniem umownego tgj. Tangens kąta j (kąt mocy) związany jest ze zwiększonym prądem płynącym do obciążenia, gdy wystę-

puje przesunięcie pomiędzy przebiegiem napięcia i prądu.

Wprowadzono pojęcie tzw. „**poboru**” **mocy biernej, indukcyjnej i pojemnościowej**, za który obciążony jest odbiorca komercyjny. Sposobem uniknięcia tych kar jest stosowanie odbiorników o charakterze rezystancyjnym lub kompensowanie odbiorów układami kompensatorów.

Firma Benning obydwie te sposoby realizuje w **nowej generacji UPS-ów serii Enertronic modular SE**.

Do doskonałych parametrów wyjściowych specjalistycznego UPS-a dochodzi **funkcjonalność kompensacji mocy biernej „pobieranej” przez UPS-a z sieci zasilającej**. W urządzeniu można sterować zmianą wejściowego kąta j tak, by urządzenie mogło kompensować grupę odbiorów zarówno o charakterze pojemnościowym, jak i indukcyjnym. W zakresie zmian wejściowego $\cos \varphi = -0,9$ do $0,9$ urządzenie dysponuje pełną wyjściową mocą czynną.

UPS Enertronic modular SE potrafi także oddać do sieci zasilającej energię zgromadzoną w baterii. Do wyjątkowych właściwości tego urządzenia należy współpraca z bateriami. Każdy moduł UPS-a będący w pełni niezależnym UPS-em z własnym układem kompensacji, z własnym układem obejściowym, można połączyć z niezależną baterią lub kilkoma łańcuchami baterii.

W zależności od producenta baterii, w systemie 1 MW, zbudowanym z modułów 40 kW ($25 \times 40 \text{ kW} \times 10 \text{ bat}$) do 250 łańcuchów bate-



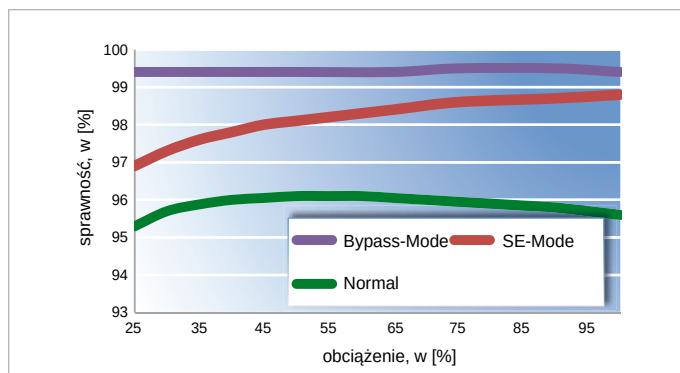
Fot. 1. Wielomodułowy UPS 200 kW z modułami Enertronic modular SE BENNING Power Electronics Sp. z o.o.

rii. Urządzenie może współpracować z bateriami ołowiovymi, niklowo-kadmowymi i litowo-jonowymi.

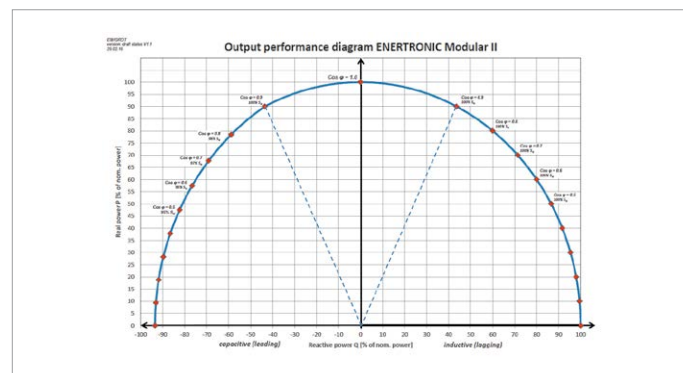
Wymienione wyżej właściwości Enertronic modular SE czynią go **prekursorem nowej generacji profesjonalnych UPS-ów kompensacyjnych** dla klientów komercyjnych.

BENNING
World Class Power Solutions

BENNING
Power Electronics Sp. z o.o.
05-503 Głusków, ul. Korczunkowa 30
tel. 22 757 84 53, tel. 22 757 36 68-70
faks 22 757 84 52
biuro@benning.biz
www.benning.pl



Rys. 1. Wykres sprawności Enertronic modular SE



Rys. 2. Wejściowa charakterystyka cos φ Enertronic modular SE



CYFROWE MIERNIKI SERII DMG

Wykonania tablicowe i modułowe

Kolorowy ekran LCD dla przejrzystego podglądu pomiarów i parametrów, menu w 10 językach

Komunikacja NFC do parametryzacji z użyciem smartfonu (Android/iOS)

Wysoka dokładność pomiarów

Wbudowany port do komunikacji: RS485 lub Ethernet

Wbudowany web serwer dla wersji wyposażonych w port Ethernet

Wykonanie z wbudowaną pamięcią do zapisu danych

Rozbudowa opcjonalnymi modułami: dodatkowe wejścia, wyjścia i porty komunikacji

Montaż tablicowy w standardowym otworze o wymiarach 92x92mm

Dostępne w ofercie wykonania z pomiarem prądu przez cewki Rogowskiego

Kompatybilne z wieloobwodowym systemem pomiarowym EASY BRANCH typu plug&play do nadzoru do 33 obciążeń 3 fazowych z użyciem jednego analizatora parametrów sieci

Szeroki wybór akcesoriów, przekładników prądowych i bramek z rejestracją danych

Zobacz więcej



Lovato
electric
ENERGY AND AUTOMATION

dr inż. Andrzej Książkiewicz - ASTAT Sp. z o.o.

Optymalizacja kosztów energii poprzez zarządzanie mocą bierną i współczynnikiem mocy – zagadnienia wybrane

Rosnące koszty energii elektrycznej zmuszają przedsiębiorstwa prywatne i jednostki publiczne do wdrażania działań zmierzających do optymalizacji wydatków energetycznych. Jednym z rozwiązań, które może przynieść oszczędności, jest instalacja systemów fotowoltaicznych, pozwalających na zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną pobieraną z sieci. Wprowadzenie takich systemów prowadzi jednak do zmiany bilansu energetycznego obiektu – ograniczeniu ulega pobór energii czynnej, podczas gdy zapotrzebowanie na energię bierną pozostaje niezmienione.

W przypadku przekroczenia umownych limitów energii biernej przedsiębiorstwo naraża się na dodatkowe opłaty, zgodnie z zapisami Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie sposobu kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń za energię elektryczną [1]. W rozporządzeniu tym określono, że za ponadumowny pobór energii biernej uznaje się sytuację, gdy współczynnik mocy $\cos \varphi$ przekracza wartość umowną $\cos \varphi_0$ (niedokompensowanie), prowadząc do nadwyżki energii biernej indukcyjnej. Standardowa wartość współczynnika mocy $\cos \varphi_0$, określona w warunkach przyłączenia lub w umowie o świadczenie usług przesyłowych, wynosi 0,4, przy czym minimalny dopuszczalny poziom to 0,2. Opłaty za nadwyżkę poboru energii biernej, wynikającą z przekroczenia $\cos \varphi_0$ w rozliczeniowym okresie kontrolnym, są naliczane zgodnie z ustalonymi zasadami dla poszczególnych stref czasowych, w których prowadzony jest monitoring zużycia tej energii, i wyznacza się je zgodnie ze wzorem:

$$Q_b = k \times C_{rk} \times \left(\sqrt{\frac{1 + \tan^2 \varphi}{1 + \tan^2 \varphi_0}} \right) \times A$$

gdzie:

Q_b – opłata za nadwyżkę energii biernej wyrażona w zł,
 k – ustalona w taryfie krotność ceny C_{rk} ,
 C_{rk} – cena energii elektrycznej, obowiązująca w dniu zatwierdzenia taryfy, wyrażona w zł/MWh lub zł/kWh,
 $\tan \varphi$ – współczynnik mocy wynikający z pobranej energii biernej,
 $\tan \varphi_0$ – umowny współczynnik mocy,
 A – energia czynna pobrana całodobowo lub w strefie czasowej, w której jest dokonywa-

na kontrola poboru energii biernej, wyrażona w MWh lub w kWh.

W przypadku energii biernej pojemnościowej dodatkowe opłaty są naliczane za każde wystąpienie poboru tej energii, niezależnie od wartości współczynnika $\tan \varphi$. Oznacza to, że nawet minimalny pobór energii biernej pojemnościowej skutkuje naliczeniem opłaty, co szczególnie dotyczy obiektów wyposażonych w instalacje generujące moc bierną pojemnościową, takie jak systemy fotowoltaiczne czy nowoczesne oświetlenie LED. Taki sposób rozliczeń sprawia, że przedsiębiorstwa muszą szczególnie monitorować charakterystyki obciążenia, aby unikać niepotrzebnych kosztów, które mogą znacząco wpłynąć na całkowity bilans kosztów energii.

Nowoczesne rozwiązania w kompensacji mocy biernej oraz przykłady zastosowań

Typowe układy kompensacji mocy biernej, bazujące na kondensatorach lub dławikach sterowanych klasycznymi stycznikami, a także układach tyrystorowych, nie zapewniają odpowiednich parametrów jakości energii w sytuacjach, gdzie występuje asymetria obciążeń, wysokie harmoniczne czy dynamiczne zmiany poboru mocy. Skutecznym rozwiązaniem są statyczne generatory mocy biernej (SVG), które dzięki zaawansowanej technologii energoelektronicznej, wykorzystującej tranzystory IGBT, oferują precyzyjną i dynamiczną kompensację.

Urządzenia SVG ASTec są wszechstronnymi rozwiązaniami do kompensacji mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej w jednym systemie. Generatory te umożliwiają niezależną kompensację dla każdej fazy, co jest szczególnie istotne



Rys. 1. Zdjęcie filtra aktywnego ASTec AHF o prądzie znamionowym 50 A

w przypadku asymetrycznych obciążeń oraz instalacji z fotowoltaiką, gdzie bilans mocy ulega zmianom. SVG ASTec zapewniają również częściową kompensację wyższych harmonicznych prądu (rzędu 3, 5, 7, 11 i 13), wspierając symetryzację obciążenia, co umożliwia równomierny pobór prądu na poszczególnych fazach.

Zastosowanie technologii energoelektronicznej pozwala na nadążną kompensację dynamiczną, co ogranicza wahania napięć i może zmniejszać wartość współczynnika migotania

STRESZCZENIE

Efektywne zarządzanie mocą bierną jest kluczowe dla optymalizacji kosztów energii elektrycznej i poprawy jakości zasilania. W artykule przedstawiono zagrożenia finansowe wynikające z przekroczenia limitów mocy biernej. Omówiono technologie kompensacyjne w postaci statycznych generatorów mocy biernej (SVG), które zapewniają dynamiczną kompensację mocy indukcyjnej i pojemnościowej, a także redukują asymetrię. Przykład praktycznego zastosowania SVG i przenośnego analizatora jakości energii elektrycznej ukazują korzyści płynące z takich rozwiązań.

Słowa kluczowe: moc bierna, kompensacja mocy biernej, statyczne generatory mocy biernej, jakość zasilania, zarządzanie energią.



Rys. 2. Zdjęcie analizatora jakości energii elektrycznej typu PQ-BOX 150 firmy A-Eberle [2]

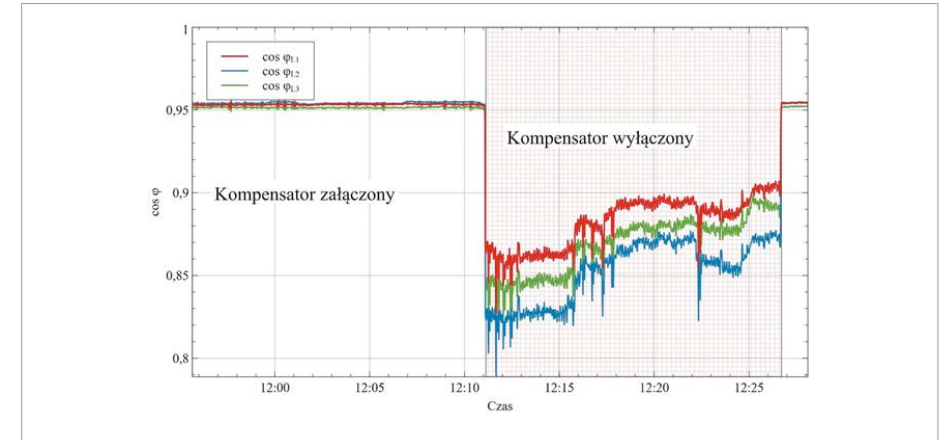
światła P_L . Zakres mocy znamionowej tych urządzeń wynosi od 10 kVAR do 100 kVAR, przy czym możliwe jest łączenie jednostek w systemy równoległe, co pozwala na ich adaptację do potrzeb zarówno małych obiektów usługowych, jak i dużych zakładów przemysłowych.

Każdy generator SVG jest wyposażony w dotykowy wyświetlacz umożliwiający konfigurację i monitorowanie działania urządzenia. Port komunikacyjny RS485 z protokołem Modbus RTU lub – po zastosowaniu konwertera – możliwość komunikacji przez Ethernet pozwala na zdalne monitorowanie parametrów pracy.

Zastosowania SVG ASTec:

- » W zakładach przemysłowych z dynamicznymi zmianami obciążenia (załączanie/wyłączanie maszyn),
- » W instalacjach, gdzie występują falowniki (wyższe harmoniczne: 5, 7, 11, 13),
- » Przy naprzemiennym zapotrzebowaniu na moc bierną indukcyjną i pojemnościową,
- » W małych obiektach komercyjnych i usługowych z obciążeniami jedno- i trójfazowymi.

Zapewnienie jakości zasilania w punkcie przesyłowym jest dokładnie uregulowane przez normy takie jak DIN EN 50160, VDE-AR-N 4120, IEC 61400-21 oraz Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Normy te stanowią podstawę umowy o przyłączenie do sieci i określają wymagania dotyczące poziomów harmonicznych, współczynnika THD oraz innych parametrów jakościowych zasilania. Właściwym narzędziem do realizacji pomiarów, które pozwalają na ocenę rzeczywistego zapotrzebowania na moc bierną oraz dobór odpowiednich układów kompensacyjnych, są analizatory przenośne klasy A. Przenośne analizatory jakości energii firmy A-Eberle, takie jak PQ-Box, umożliwiają precyzyjne pomiary i analizę parametrów jakości zasilania, zgodnie z normą PN-EN 61000-4-30.



Rys. 3. Wykres zmian wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$ przy załączonym i wyłączonym układzie kompensacji mocy biernej

Analizatory PQ-Box, dostępne w różnych konfiguracjach, oferują elastyczne rozwiązania pomiarowe. Uniwersalny model PQ-Box 50 jest kompaktowy i wyposażony w zintegrowaną jednostkę zasilającą, co sprawia, że idealnie nadaje się do mobilnych pomiarów w trudnych warunkach. Model PQ-Box 150, zaprojektowany do pracy w sieciach niskiego, średniego i wysokiego napięcia, umożliwia szybkie lokalizowanie źródeł zakłóceń oraz wykonywanie dokładnych pomiarów, nawet w miejscach o ograniczonej przestrzeni, co czyni go cennym narzędziem przy analizie jakości energii i ocenie potrzeb kompensacyjnych w różnych środowiskach elektroenergetycznych.

Jakość kompensacji można ocenić na podstawie zmierzonych wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$ (rys. 3.) pochodzącego z pomiarów w zakładzie przemysłowym. Wartość współczynnika $\cos \varphi$, osiągana podczas pracy generatorów SVG, pozostaje stabilna dla każdej fazy i utrzymuje się na poziomie 0,95, co świadczy o skutecznej kompensacji niezależnie od charakteru obciążenia. W przypadku wyłączenia generatorów, współczynnik mocy spada poniżej 0,9, co odpowiada wartości współczynnika $\tan \varphi$ nie mniejszej niż 0,48. Urządzenie zapewnia kompensację niezależnie dla każdej fazy, co pozwala skutecznie zredukować asymetrię tego parametru, często wynikającą z nierównomiernego rozłożenia obciążeń w sieci. Dzięki temu generator SVG skutecznie stabilizuje współczynnik mocy przy obciążeniach o różnym charakterze, zapewniając efektywną pracę zarówno przy poborze mocy indukcyjnej, jak i pojemnościowej.

Podsumowanie

Artykuł omawia znaczenie zarządzania mocą bierną w kontekście optymalizacji kosztów ener-

gii elektrycznej w przedsiębiorstwach. Przedstawiono możliwości technologiczne, takie jak statyczne generatory mocy biernej (SVG), które skutecznie kompensują zarówno moc bierną indukcyjną, jak i pojemnościową, a także eliminują negatywne skutki asymetrii obciążenia. Właściwy dobór rozwiązania może bazować na pomiarach jakości energii elektrycznej realizowanych z wykorzystaniem przenośnych analizatorów jakości energii elektrycznej. Analizatory te pozwalają dokładnie określić dynamikę zmian mocy biernej i jej rzeczywiste zapotrzebowanie, jak również ocenić inne parametry jakościowe. Jest to wręcz niezbędny krok przed wybraniem właściwego układu kompensacji, szczególnie istotny przy układach kompensacji większych mocy.

Literatura

1. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie sposobu kształtowania i kalkulacji taryf oraz sposobu rozliczeń w obrocie energią elektryczną
2. <https://www.a-eberle.de/en/downloads/downloads-power-quality-mobile/>

ABSTRACT

Optimisation of energy costs through reactive power and power factor management

Effective management of reactive power is key to optimising electricity costs and improving power quality. The article outlines the financial risks of exceeding reactive power limits. Compensation technologies in the form of static reactive power generators (SVGs), which provide dynamic compensation of inductive and capacitive power and reduce asymmetry, are discussed. An example of a practical application of SVGs and a portable power quality analyser demonstrate the benefits of such solutions.

Keywords: reactive power, reactive power compensation, Static Var Generators, power quality, energy management.

dr inż. Andrzej Książkiewicz, mgr inż. Magdalena Jatczak – Astat Sp. z o.o.

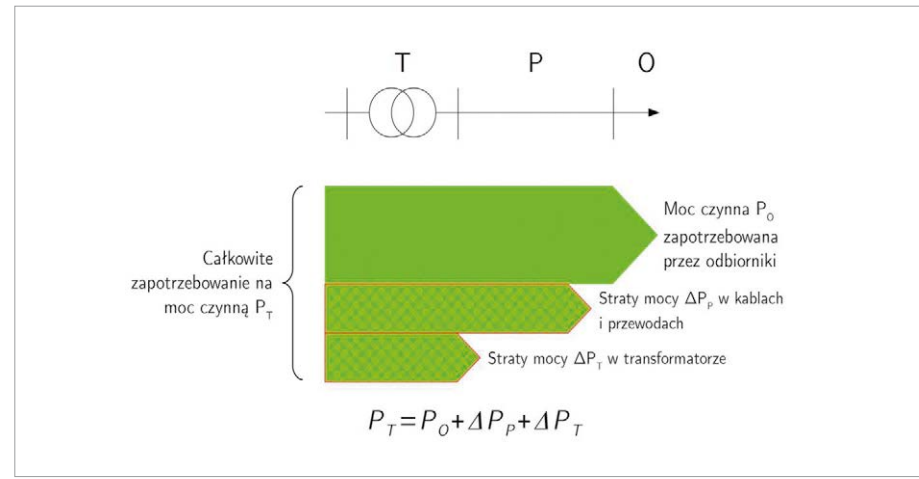
Jakość kompensacji mocy biernej na podstawie działania filtra aktywnego AHF

Jakość Energii Elektrycznej (JEE) w każdym zakładzie przemysłowym czy produkcyjnym jest inna i uzależniona od wielu czynników. Coraz powszechniejsze stosowanie elementów energoelektronicznych w przemyśle prowadzi do przepływu prądów o kształtach (wyższe harmoniczne prądu) w układzie elektroenergetycznym.

Z tego powodu pojawiają się problemy wywołane wyższymi harmonicznymi prądu, takie jak:

- » przeciążenie przewodów neutralnych,
- » przegrzanie transformatorów,
- » niepożądane zadziaływanie wyłączników automatycznych,
- » przeciążenie baterii kondensatorowych do korekcji współczynnika mocy,
- » generowanie dodatkowych strat mocy czynnej.

Jednym z elementów Jakości Energii Elektrycznej (JEE) w zakładzie przemysłowym jest



Rys. 1. Rozpływ mocy czynnej i strat mocy w zakładzie przemysłowym rys. A. Książkiewicz, M. Jatczak

prawidłowa gospodarka mocą bierną. Przesył mocy biernej przez elementy układu zasilającego prowadzi m.in. do następujących konsekwencji:

- » zmniejsza dopuszczalną obciążalność mocą czynną,
- » zwiększa straty mocy czynnej ΔP ,

- » wywołuje straty mocy biernej ΔQ ,
- » zwiększa spadki napięcia ΔU ,
- » prowadzi do pojawienia się wahań napięcia, związanych z dynamicznymi zmianami poboru mocy biernej [1].

Rozpływ mocy czynnej w zakładzie przemysłowym i wywołanych z tego tytułu strat mocy pokazano na **rysunku 1**. Zapotrzebowanie na moc czynną P_0 przez odbiorniki energii elektrycznej zależy od ich mocy znamionowej oraz reżimu ich pracy. Przesył mocy P_0 generuje straty mocy w przewodach, kablach czy przewodach szynowych, a także w transformatorze zasilającym. Obniżenie mocy zapotrzebowanej jest możliwe tylko przez zmianę samego procesu technologicznego, co jest raczej niemożliwe bez znacznych nakładów inwestycyjnych. Ograniczenie strat przesyłowych możliwe jest przez wymianę elementów na takie o większych przekrojach lub ewentualnie wymianę transformatora na jednostkę o większej mocy. Rozwiązania te również wiążą się z wysokimi nakładami finansowymi, przerwą w produkcji i nie gwarantują uzyskania oszczędności.

Optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie kompensacji mocy biernej. Rozwiązania

te pozwalają na generację zapotrzebowanej mocy biernej w miejscu jej zapotrzebowania. Prowadzi to do odciążenia układu zasilającego, zmniejszenia strat mocy czynnej i biernej oraz redukcji spadków napięcia. Następuje dzięki temu ogólna poprawa parametrów energii elektrycznej w zakładzie. Kompensacja mocy biernej pozwala również na uzyskanie korzyści ekonomicznych [2].

Układy kompensacyjne w postaci filtrów aktywnych (oraz statycznych generatorów mocy biernej SVG) pozwalają na kompensację mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej w jednym urządzeniu, symetryzując obciążenia, charakteryzując się praktycznie nieograniczoną liczbą cykli łączeniowych. Urządzenia te pozwalają również na filtrację wyższych harmonicznych prądu do rzędu 50. (dla SVG do 13. rzędu), a dzięki ciągłej kontroli pobieranego prądu nie zachodzą zjawiska rezonansowe.

Na szczególną uwagę zasługują następujące problemy związane z kompensacją mocy biernej:

- » szybkie zmiany zapotrzebowania na moc bierną,
- » częste zmiany wartości zapotrzebowanej mocy,
- » naprzemienne zapotrzebowanie na moc bierną pojemnościową i indukcyjną,
- » asymetryczne zapotrzebowanie na moc bierną.

Kompensacja mocy biernej za pomocą filtrów aktywnych

Energoelektroniczne filtry aktywne pozwalają na realizację kompensacji przy występowaniu jednego lub wielu wskazanych wyżej problemów. Ze względu na brak elementów elektromechanicznych w postaci styczników wykazują wydłużoną żywotność w porównaniu z klasycznymi układami kompensacji – w kontekście liczby i częstotliwości przełączeń. Realizują kompensację w układach z asymetrycznym obciążeniem. Dzięki nadążnemu procesowi regulacji możliwa jest kompensacja przy szybkich zmianach zapotrzebowania na moc bierną, z czasem odpowiedzi przeważnie nie dłuższym niż 20 ms.

Przeprowadzono próby kompensacji mocy biernej w obiekcie o charakterze biurowo-produkcyjnym. Kompensacja realizowana była poprzez układ o prądzie znamionowym 50 A, pomiar prądu realizowany był poprzez przekładniki prądowe o przekładni 150/5 i klasie 0,2 s. Pomiar jakości kompensacji realizowany był z wykorzystaniem przenośnego analiza-

Wartość statyczna	P _{L1} [W]	P _{L2} [W]	P _{L3} [W]	Q _{L1} [VAR]	Q _{L2} [VAR]	Q _{L3} [VAR]	cos φ _{L1} [-]	cos φ _{L2} [-]	cos φ _{L3} [-]
Minimum	2 921,9	7 118,9	7 118,9	2 959,7	2 676,7	2 518,6	0,565	0,878	0,570
Maksimum	5 786,1	8 794,9	8 794,9	6 523,7	4 685,1	5 328,9	0,881	0,938	0,903
Średnia	4 395,6	7 970,2	7 970,2	5 229,2	3 650,2	4 127,9	0,632	0,910	0,674
Odchylenie standardowe	1 330,6	729,5	729,5	1 155,9	945,0	1 031,5	0,071	0,027	0,085
Rozstęp	2 864,2	1 676,0	1 676,0	3 564,0	2 008,4	2 810,3	0,317	0,060	0,334

Tab. 1. Wartości wybranych wielkości statystycznych przy wyłączonym układzie kompensacyjnym; nastawiona wartość współczynnika mocy wynosi 0,95

Wartość statyczna	P _{L1} [W]	P _{L2} [W]	P _{L3} [W]	Q _{L1} [VAR]	Q _{L2} [VAR]	Q _{L3} [VAR]	cos φ _{L1} [-]	cos φ _{L2} [-]	cos φ _{L3} [-]
Minimum	1 766,4	5 298,6	5 298,6	723,2	1 819,8	840,3	0,897	0,944	0,914
Maksimum	5 510,5	9 504,5	9 504,5	2 099,2	3 193,4	1 959,5	0,940	0,949	0,947
Średnia	3 682,6	6 670,2	6 670,2	1 395,0	2 254,9	1 188,3	0,935	0,947	0,944
Odchylenie standardowe	726,2	1 215,3	1 215,3	264,4	398,1	312,3	0,003	0,001	0,002
Rozstęp	3 744,1	4 205,9	4 205,9	1 376,0	1 373,6	1 119,1	0,043	0,005	0,033

Tab. 2. Wartości wybranych wielkości statystycznych przy załączonym układzie kompensacyjnym; nastawiona wartość współczynnika mocy wynosi 0,95

Wartość statyczna	P _{L1} [W]	P _{L2} [W]	P _{L3} [W]	Q _{L1} [VAR]	Q _{L2} [VAR]	Q _{L3} [VAR]	cos φ _{L1} [-]	cos φ _{L2} [-]	cos φ _{L3} [-]
Minimum	5 097,7	8 485,3	8 485,3	3 860,3	2 518,7	2 641,6	0,664	0,830	0,617
Maksimum	9 020,8	10 814,5	10 814,5	7 867,8	6 132,2	6 075,6	0,808	0,960	0,798
Średnia	7 518,0	9 571,2	9 571,2	7 037,7	5 243,8	5 380,4	0,727	0,876	0,725
Odchylenie standardowe	1 196,0	721,0	721,0	776,9	715,4	833,8	0,037	0,025	0,042
Rozstęp	3 923,1	2 329,1	2 329,1	4 007,5	3 613,4	3 434,0	0,143	0,131	0,181

Tab. 3. Wartości wybranych wielkości statystycznych przy wyłączonym układzie kompensacyjnym; nastawiona wartość współczynnika mocy wynosi 0,98

Wartość statyczna	P _{L1} [W]	P _{L2} [W]	P _{L3} [W]	Q _{L1} [VAR]	Q _{L2} [VAR]	Q _{L3} [VAR]	cos φ _{L1} [-]	cos φ _{L2} [-]	cos φ _{L3} [-]
Minimum	2 669,0	7 130,9	7 130,9	605,0	980,0	541,7	0,868	0,973	0,881
Maksimum	8 837,9	11 703,2	11 703,2	2 954,5	2 073,7	2 001,0	0,987	0,991	0,990
Średnia	5 479,5	9 072,5	9 072,5	1 010,1	1 296,2	855,1	0,982	0,990	0,987
Odchylenie standardowe	1 855,3	660,7	660,7	286,9	135,3	220,1	0,008	0,001	0,006
Rozstęp	6 168,9	4 572,3	4 572,3	2 349,5	1 093,7	1 459,4	0,119	0,019	0,109

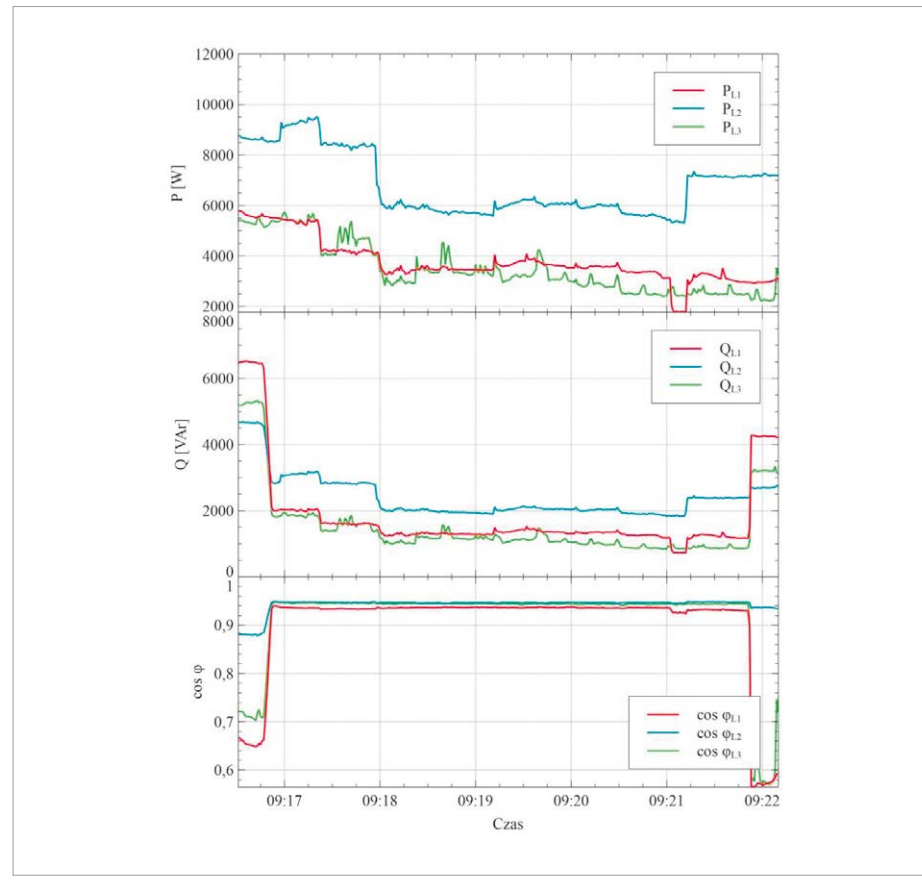
Tab. 4. Wartości wybranych wielkości statystycznych przy załączonym układzie kompensacyjnym; nastawiona wartość współczynnika mocy wynosi 0,98

tora jakości energii elektrycznej typu PQ-Box 150 firmy A-Eberle, wyposażonego w cewki Rogowskiego. Pomiary przeprowadzono podczas normalnego dnia pracy zakładu w godzinach porannych. Wykonano dwie próby dla dwóch nastaw współczynnika mocy, wynoszącego odpowiednio 0,95 i 0,98. Opcje kompensacji wyższych harmonicznych oraz symetryzacji obciążeń były wyłączone.

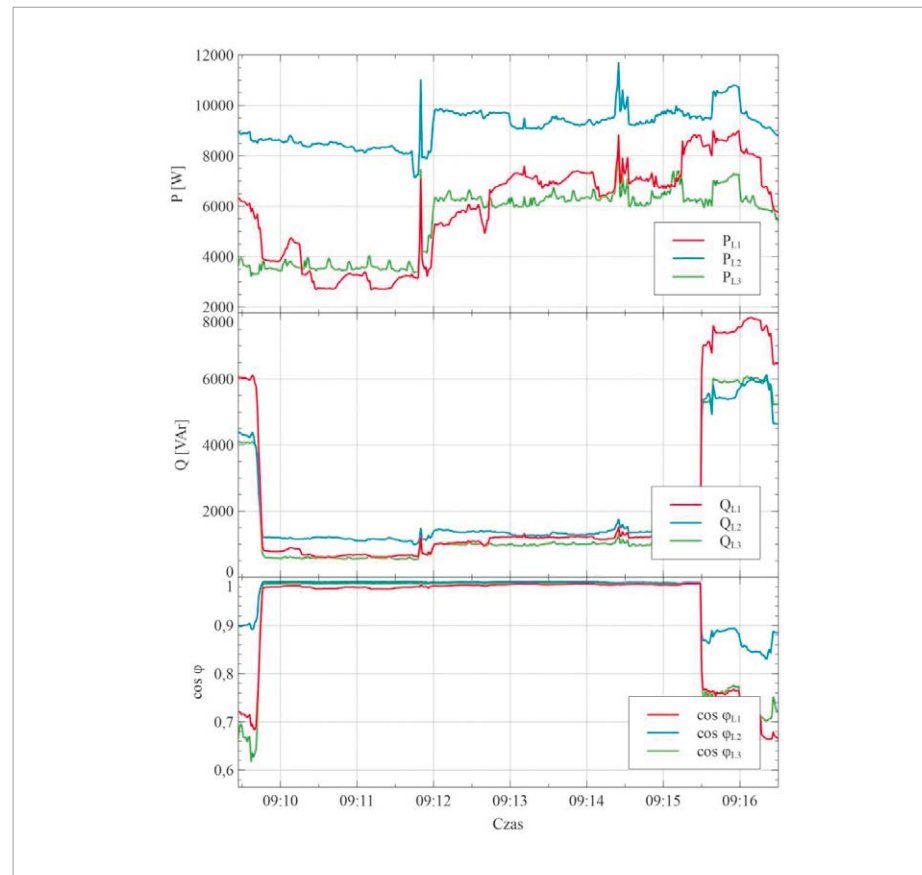
Na **rysunku 3**, przedstawiono wykres zmienności wartości mocy czynnej, biernej i współczynnika mocy $\cos \phi$ przy nastawionej wartości współczynnika mocy kompensatora na 0,95. Analizie poddano wartości mocy czynnych, biernych składowej podstawowej harmonicznej oraz współczynników mocy dla poszczególnych faz – w trakcie działania kompensatora oraz przy jego wyłączeniu.



Rys. 2. Widok kompensatora mocy biernej ASTec rys. A. Książkiewicz, M. Jatczak



Rys. 3. Wykres zmienności wartości mocy czynnej, bierniej i współczynnika mocy $\cos \varphi$; wartość nastawiona współczynnika mocy kompensatora 0,95 rys. A. Książkiewicz, M. Jatczak



Rys. 4. Wykres zmienności wartości mocy czynnej, bierniej i współczynnika mocy $\cos \varphi$; wartość nastawiona współczynnika mocy kompensatora 0,98 rys. A. Książkiewicz, M. Jatczak

Pierwsza próba działania kompensatora wykonana została dla nastawy wartości współczynnika mocy na poziomie 0,95. Wartości wybranych wielkości statystycznych przy wyłączonym i załączonym układzie kompensacyjnym przedstawiono odpowiednio w tabelach 1. i 2. Wykres czasowy zmian rejestrowanych wartości mocy czynnych, biernych i współczynnika mocy przedstawiono na rysunku 3. Moc czynna w całym rozpatrywanym przedziale pomiarowym wykazywała pewne zmiany, przy czym faza L2 wykazuje się największym poborem mocy czynnej, a fazy L1 i L3 – zbliżonym do siebie, niższym niż L2. Moment załączenia i wyłączenia układu kompensującego następuje przy widocznych na wykresie (rys. 3.) zmianach wartości mocy bierniej i współczynnika mocy. Na tej podstawie można określić zmianę wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$ oraz zmianę jego wartości w stosunku do wartości nastawionej jako miarę jakości samego urządzenia. Przy wyłączonym układzie kompensacyjnym średnia wartość $\cos \varphi$ dla trzech faz wynosiła odpowiednio: L1 = 0,632, L2 = 0,910 i L3 = 0,674, przy wymaganym poziomie nie niższym niż 0,928 ($\tan \varphi < 0,4$). Można zauważyć, że wyraźnie niższy poziom współczynnika występuje dla faz pierwszej i trzeciej. Widoczna jest również asymetria tego współczynnika, która koreluje z asymetrią zarejestrowanej mocy czynnej. Obserwowane są znaczne wahania współczynnika $\cos \varphi$, w szczególności dla fazy L1 i L3, widoczne w przedstawionych wartościach odchylenia standardowego i rozstępu.

Załączenie układu kompensacyjnego w wyraźny sposób poprawia wartość współczynnika mocy. Jego wartość średnia wynosi odpowiednio dla każdej z faz: L1 = 0,935, L2 = 0,947, L3 = 0,944. Odnosząc te wartości do nastawionego współczynnika mocy, nie różnią się one od siebie o więcej niż 1,6%. Porównując zmierzona wartość minimalną i maksymalną z wartością nastawioną dla wszystkich faz, widać, że różnice nie przekraczają odpowiednio 5,6% i 1,05%. Przy czym wszystkie są poniżej wartości docelowej.

Druga próba działania kompensatora wykonana została dla nastawy wartości współczynnika mocy na poziomie 0,98. Wartości wybranych wielkości statystycznych przy wyłączonym i załączonym układzie kompensacyjnym przedstawiono odpowiednio w tabelach 3. i 4. Wykres czasowy zmian rejestrowanych wartości mocy czynnych, biernych i współczynnika mocy przedstawiono na rysunku 4. Podobnie jak w pierwszym przypadku – moc czynna

w całym rozpatrywanym przedziale pomiarowym notowała pewne zmiany, przy czym faza L2 wykazuje się największym poborem mocy czynnej, a fazy L1 i L3 – zbliżonym do siebie, niższym niż L2. Przy wyłączonym układzie kompensacyjnym średnia wartość $\cos \varphi$ dla trzech faz wynosiła odpowiednio: L1 = 0,727, L2 = 0,876 i L3 = 0,725. Można zauważyć, że wyraźnie niższy poziom współczynnika występuje dla faz pierwszej i trzeciej. Widoczna jest również asymetria tego współczynnika, która koreluje z asymetrią zarejestrowanej mocy czynnej. Obserwowane są znaczne wahania współczynnika $\cos \varphi$, w szczególności dla faz L1 i L3, widoczne w przedstawionych wartościach odchylenia standardowego i rozstępu.

Załączenie układu kompensacyjnego w wyraźny sposób poprawia wartość współczynnika mocy. Jego wartość średnia wynosi odpowiednio dla każdej z faz: L1 = 0,982, L2 = 0,990, L3 = 0,987. Odnosząc te wartości do nastawionego współczynnika mocy, można zauważyć, że nie różnią się one od siebie o więcej niż 1,02%. Porównując zmierzona wartość minimalną i maksymalną z wartością nastawioną dla wszystkich faz, widać, że różnice nie przekraczają odpowiednio 13,9% i 1,12%. Przy czym

wartości minimalne wypadają poniżej wartości nastawionej, a maksymalne – powyżej. Wysoka pierwsza z wymienionych wartości związana będzie z samym procesem pomiarowym, gdzie interwał pomiarowy wynosił jedną sekundę. W tym czasie następuje uśrednianie wyników. Pomińnięcie próbki pomiarowej, w której następuje załączenie kompensatora, będzie prowadziło do zmiany otrzymanych wyników do poziomu: 1,4% dla minimum i 1,15% dla maksimum.

Podsumowanie

Przedstawione powyżej analizy wskazują na skuteczność kompensacji mocy bierniej z wykorzystaniem filtrów aktywnych. W żadnym przypadku nie nastąpiło nieskompensowanie lub przekompensowanie, a w szczególności nie nastąpił pobór mocy bierniej o charakterze pojemnościowym. Co więcej, jakość kompensacji, mierzona różnicą wartości otrzymanej od wartości nastawionej współczynnika mocy $\cos \varphi$, należy ocenić bardzo wysoko. W każdym przypadku różnica ta nie osiągnęła większej wartości niż 1,6%. Widoczna jest stabilna praca układu, niezależnie od zmian poboru mocy czynnej. Równocześnie należy wska-

zać na skuteczność kompensacji w przypadku asymetrii obciążenia.

Bibliografia

1. S. Kujszczyk, Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
2. K. Habelok, M. Stępień, Analiza wpływu kompensacji mocy bierniej na wysokość opłat za energię elektryczną na przykładzie hali sportowej, „Przegląd Elektrotechniczny”, 93(10)/2017, s. 158–161.
3. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. nr 93, poz. 623).

ABSTRACT

Quality of reactive power compensation based on the performance of active harmonic filters

The article presents the results of measurements of reactive power compensation, realized with an active filter AHF. The evaluation of the quality of compensation, for two settings of the compensator, based on the evaluation of the power factor is presented.

Keywords: active filters, power quality, compensation, reactive energy.

REKLAMA

UPS, ZESPOŁY PRĄDOTWÓRCZE

pobierz bezpłatny poradnik i dowiedz się więcej

Poradnik
UPS, ZESPOŁY PRĄDOTWÓRCZE

- Zasilanie sieci komputerowych i urządzeń domowych
- Zasilacze DBUPS w systemach zasilania gwarantowanego obiektów data center
- Zasilacze UPS w układach zasilania urządzeń elektromedycznych

Kompensacja mocy biernej przy zasilaniu budynków z sieci elektroenergetycznej oraz zasilaniu z instalacji PV

Odnawialne Źródła Energii nieustannie zwiększają swój udział w systemie elektroenergetycznym na każdym poziomie napięć. Obecnie zainstalowana moc OZE wynosi prawie 10 GW, z czego największy udział mają instalacje wykorzystujące energię wiatru (moc zainstalowana na poziomie 6,4 GW). Najsilniejszy wzrost mocy zainstalowanej notują farmy fotowoltaiczne, gdzie na koniec 2019 roku moc zainstalowana wynosiła 477 MW, a już po roku osiągnęła poziom 887 MW [1]. Wraz z najnowszymi planami Europejskiego Zielonego Ładu można spodziewać się dalszego rozwoju instalacji Odnawialnych Źródeł Energii.

S tosowanie paneli fotowoltaicznych możliwe jest praktycznie dla każdego typu odbiorcy, prosumenta, od pojedynczych instalacji małych mocy (mikroinstalacji), do przyzakładowych elektrowni fotowoltaicznych. Ich montaż w sposób znaczący wpływa na bilans mocy w układzie elektroenergetycznym obiektu lub zakładu produkcyjnego. W szczególnych sytuacjach może to prowadzić do wzrostu opłat za energię bierną ze względu na pogorszenie współczynnika mocy.

Dynamiczne kompensatory energoelektroniczne

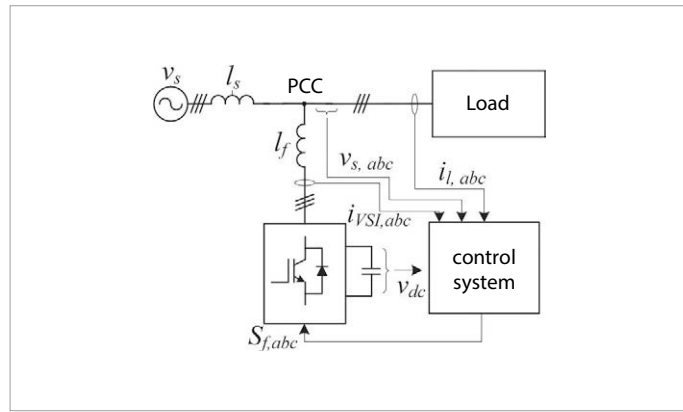
Typowe układy kompensujące, oparte na bateriach kondensatorowych lub dławikowych sterowanych klasycznymi stycznikami, a nawet poprzez układy tyrystorowe, nie są w stanie zapewnić właściwych parametrów jakości energii, przy kompensacji mocy biernej w układach zasilających niektóre odbiorniki. Na szczególną uwagę zasługują następujące problemy związane z kompensacją mocy biernej:

- » szybkie zmiany zapotrzebowania na moc bierną,
- » częste zmiany wartości zapotrzebowanej mocy,
- » naprzemienne zapotrzebowanie na moc bierną pojemnościową i indukcyjną,

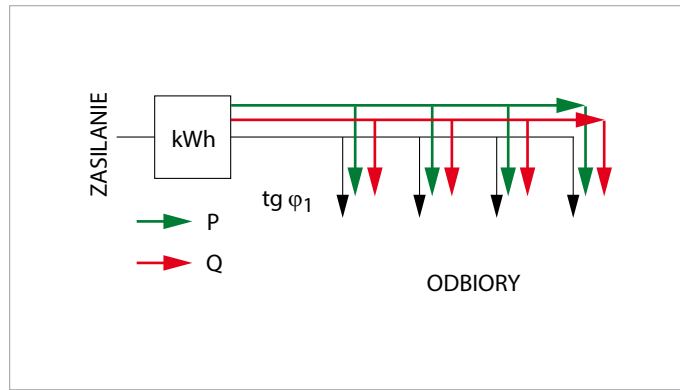
» asymetryczne obciążenie poszczególnych faz.

Rozwiązaniem, jakie można tutaj zaproponować, są statyczne generatory mocy biernej, tzw. SVG. Są to urządzenia energoelektroniczne, wykorzystujące do swojego działania układy tranzystorów IGBT (**rys. 1.**), które kluczując wg określonego algorytmu regulacji, załączają kondensator i w ten sposób generują przepływ mocy biernej.

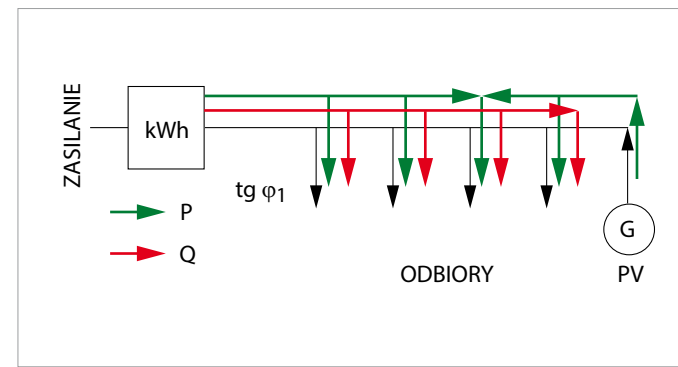
Porównując wybrane cechy układów kompensacyjnych, związanych z szybkością ich działania, należy zwrócić uwagę na czynniki takie jak: częstość łączeń, liczbę cykli łączeniowych oraz charakter kompensacji (**tab. 1.**). Dla układów tradycyjnych, opartych na łącznikach stycznikowych, ograniczona jest zarówno częstość łączeń, jak i liczba cykli łączeniowych. Styczniki łączeniowe stosowane w bateriach kondensatorów pozwalają na ok. 100 przełączeń w ciągu godziny i około 100 tys. do 400 tys. łączeń elektrycznych w cyklu życia produktu



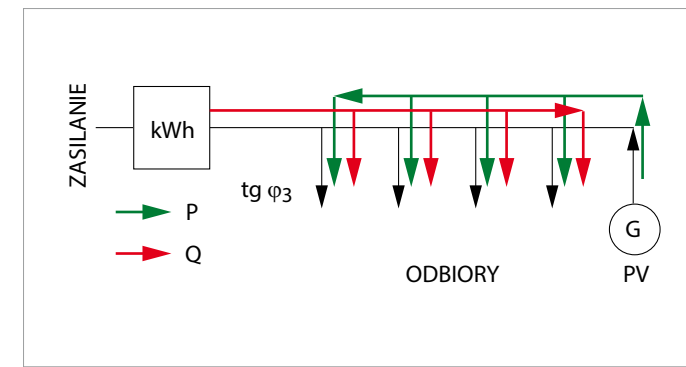
Rys. 1. Schemat blokowy statycznego generatora mocy biernej [2]



Rys. 2. Rozpływ mocy czynnej i biernej w układzie zasilanym tylko z sieci elektroenergetycznej rys. A. Książkiewicz



Rys. 3. Rozpływ mocy czynnej i biernej w układzie zasilanym z sieci elektroenergetycznej i źródeł fotowoltaicznych; moc PV mniejsza niż moc zapotrzebowania odbiorników rys. A. Książkiewicz



Rys. 4. Rozpływ mocy czynnej i biernej w układzie zasilanym z sieci elektroenergetycznej i źródeł fotowoltaicznych; moc PV większa niż moc zapotrzebowania odbiorników rys. A. Książkiewicz

(zależnie od modelu i producenta). Równocześnie kompensacja ma charakter skokowy, a nie płynny. Lepsze parametry uzyskuje się przy kompensacji z układami tyrystorowymi pełniącymi funkcję łączników poszczególnych członów kompensacji. Nadal jednak ta kompensacja ma charakter skokowy.

Układy kompensacyjne SVG pozwalają na kompensację mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej w jednym urządzeniu, symetryzację obciążeń, praktycznie nieograniczoną liczbę cykli łączeniowych. Urządzenia te zapewniają również uzupełniającą filtrację nieparzystych wyższych harmonicznych prądu do trzynastego rzędu, a dzięki ciągłej kontroli pobieranego prądu nie zachodzą zjawiska rezonansowe.

Kompensatory SVG pozwalają na nadążną kompensację, niezależną dla każdej z faz, co umożliwia ograniczenie zapotrzebowania na moc bierną także w układach, gdzie dynamika zmian obciążenia jest znaczna. Niedostosowanie układu kompensacyjnego, gdzie występuje asymetria obciążenia, może prowadzić do niezadowalających rezultatów w zakresie kompensacji [3].

Przy czasie odpowiedzi na zmiany zapotrzebowania nie dłuższym niż 1 ms generowana moc bierna dostarczana jest do odbiornika płynnie, praktycznie bez obciążania układu za-

silającego. Dodatkowo urządzenia pozwalają na generację mocy biernej o charakterze pojemnościowym lub indukcyjnym, co ma zastosowanie w zakładach, gdzie, np. w porze nocnej lub dni wolne od pracy, charakter zapotrzebowanej mocy biernej zmienia się z indukcyjnego na pojemnościowy. Zastosowanie energoelektronicznych układów załączających pozwala na prawie nieograniczoną liczbę cykli łączeniowych.

Wpływ źródeł fotowoltaicznych na jakość kompensacji mocy biernej

Dla tradycyjnego układu zasilania przyjmuje się, że przepływ mocy następuje z jednego punktu zasilającego (**rys. 2.**). Pomiar mocy czynnej oraz biernej następuje w układzie pomiarowym poprzez licznik energii elektrycznej. Wartość współczynnika $\text{tg } \varphi_1$ jest rzeczywista i uzależniona od całkowitego poboru mocy przez wszystkie odbiorniki energii elektrycznej. Zastosowanie kompensacji mocy biernej w takim układzie nie będzie narażało większych problemów w zakresie pomiaru tego współczynnika, jak i przeprowadzania samej kompensacji. Wystarczające jest zainstalowanie kompletu przekładników prądowych za układem kontrolno-pomiarowym i doprowadzenie ich sygnału wyjściowego do kompensatora SVG. W takim układzie, niezależnie od

miejsca przyłączenia samego kompensatora, nastąpi prawidłowa kompensacja mocy biernej.

Włączenie źródeł fotowoltaicznych do układu zasilania zmienia przepływ mocy w istotny sposób. Jeżeli instalacja PV dołączana jest do obiektu istniejącego, może zostać podłączona w rozdzielni pod dostępne pole rezerwowe. Tym samym dodatkowe źródło energii może pojawić się, z punktu widzenia elektrycznego, na końcu układu zasilania (**rys. 3.**). Bilans mocy w takim układzie będzie uzależniony od:

- » mocy zainstalowanej źródeł fotowoltaicznych,
- » chwilowej generowanej wartości mocy czynnej,
- » aktualnego zapotrzebowania na moc odbiorników elektrycznych.

Podczas pracy źródeł fotowoltaicznych, przy typowej nastawie współczynnika mocy $\cos \varphi$ ma wartość jeden w układzie inwertera, część lub całość mocy czynnej zapotrzebowanej przez odbiorniki zostanie zaspokojona ze źródła PV (**rys. 4.**). Uwzględniając czynniki wymienione wcześniej może nastąpić również generacja energii do sieci elektroenergetycznej. Zarówno przy częściowym, jak i całkowitym zapotrzebowaniu mocy czynnej przez źródła fotowoltaiczne zmieni się wartość współczynnika $\text{tg } \varphi$ w punkcie kontrolno-pomiaro-

Cechy układu kompensacyjnego	Rodzaj zastosowanego kompensatora		
	Układy z łączeniem stycznikowym	Układy z łączeniem elektronicznym	Układy SVG
Częstość łączeń	Kilka do kilkunastu na godzinę	Nieograniczona	Nieograniczona
Liczba cykli łączeniowych	Uzależniona od łącznika mechanicznego	Nieograniczona	Nieograniczona
Charakter kompensacji	Skokowa	Skokowa	Płynna

Tab. 1. Porównanie wybranych cech układów kompensacyjnych

wym, gdzie został zainstalowany licznik energii elektrycznej.

Przy częściowym zaspokajaniu mocy czynnej przez źródła PV wartość współczynnika $\cos \phi$ będzie rosła. Wynika to z niezmiennych wartości pobieranej mocy bierniej przy niższej wartości pobieranej mocy czynnej z systemu elektroenergetycznego. Przy rosnącym zaspokajaniu zapotrzebowania na moc czynną przez system fotowoltaiczny teoretycznie wartość współczynnika $\cos \phi$ będzie rosła do nieskończoności. W sytuacji krytycznej z systemu elektroenergetycznego nie będzie pobierana żadna moc czynna przy niezmiennych wartościach mocy bierniej.

Takie zjawiska stwarzać będą dodatkowe trudności dla układu kompensacyjnego, który do prawidłowej pracy i wyznaczania wymaganego poziomu kompensacji oczekuje przepływu mocy czynnej w obwodzie pomiarowym. Rozważone zostaną dwie następujące sytuacje. Pierwsza, w której układ kompensacyjny jest podłączony jako pierwszy za układem rozliczeniowym, a elementy fotowoltaiczne podłączone są, z punktu widzenia elektrycznego, głębiej w układzie zasilania. Może to mieć miejsce, gdzie w rozdzielni elektrycznej inwerter podłączony jest pod istniejące pole rezerwowe. Układ pomiarowy kompensatora (przekład-

nik prądowy CT, **rys. 5.**) mierzy ten sam prąd co układ rozliczeniowy. Zgodnie z tym co zostało przedstawione wcześniej, mierzona wartość współczynnika $\cos \phi$ może osiągać różne wartości, w tym znacznie przekraczające dopuszczalną wartość, wynoszącą 0,4 [4]. Działanie będzie tak również przy sprawianiu działających wszystkich elementach układu zasilającego. Może to prowadzić do naliczania dodatkowych opłat z tytułu nadumownego poboru energii bierniej. Największe zagrożenie wystąpi w sytuacji, gdy moc czynna pobierana z sieci będzie dążyć do zera. Regulator kompensatora nie będzie w stanie wtedy prawidłowo ocenić wymaganego poziomu kompensacji.

Drużga sytuacja (**rys. 6.**) dotyczy układu, w którym zasilanie z systemu elektroenergetycznego oraz z instalacji fotowoltaicznej znajdują się przed punktem przyłączenia układu kompensacyjnego. W takim układzie pomiar współczynnika $\cos \phi$ będzie odbywał się poprawnie i w samym punkcie przyłączenia utrzymywany będzie na wymaganym poziomie.

Jednocześnie przy pełnym zapotrzebowaniu mocy czynnej przez odbiory, zaspokajanego przez instalacje PV, moc czynna pobierana z sieci przez licznik energii elektrycznej będzie dążyć do zera. Moc bierna nadal jednak w całości pobierana będzie z sieci. Oznacza

to, że od strony dostawcy energii nie będzie zachowana wymagana wartość współczynnika mocy.

I Podsumowanie

Opisane przypadki są szczególne, mogą występować tylko przejściowo lub trwale i są uzależnione od wielu czynników. Mogą występować sytuacje, w których będą naliczane dodatkowe opłaty przez dostawcę energii elektrycznej, z tytułu nadumownego poboru energii bierniej. Może to się wydarzyć także w przypadku, kiedy wszystkie elementy układu zasilającego działają poprawnie. Różne możliwości konfiguracji układu zasilającego utrudniają analizę zagadnienia i określenie pojedynczego rozwiązania opisanego problemu. W chwili podjęcia decyzji o inwestycji w źródła fotowoltaiczne koniecznym może być przeanalizowanie bilansu mocy bierniej dla całego obiektu bądź zakładu przemysłowego.

I Literatura

- https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-miesieczne-z-funkcjonowania-kse/raporty-miesieczne.
- R. Cimbals, O. Krievs, and L. Ribickis, *A Static Synchronous Compensator for Displacement Power Factor Correction under Distorted Mains Voltage Conditions*, ELEKTRON ELEKTROTECH, 110(4)/2011, s. 71–76.
- G. Hołdyński, Z. Skibko, Wpływ asymetrycznego obciążenia na pracę układów kompensacyjnych, „elektro.info”, 3/2019, s. 72–76.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz.U. Nr 93, poz. 623.

ABSTRACT

Reactive power compensation in buildings supplied from the power grid and PV installations

There is a constant increase in the installed power of photovoltaic sources in the system, at every voltage level. This leads to changes in the power balance in the recipient's power installations. These changes will be influenced by many factors, but the end result will be a deterioration of the power factor, and thus additional charges for over-contractual reactive energy consumption. The article presents selected issues related to reactive power compensation in facilities where photovoltaic sources are used.

Keywords: RES, photovoltaics, reactive power compensation, SVG.



ELEKTROBUD

ICZ-E NOWOCZESNE ROZWIĄZANIE DO HAL PRZEMYSŁOWYCH

Ogranicz do minimum straty w przesyłce energii elektrycznej

Dzięki zastosowaniu unikalnych rozwiązań, wewnętrzna, kompaktowa stacja transformatorowa ICZ-E generuje o wiele niższe straty ciepła niż tradycyjne stacje transformatorowe (zarówno kontenerowe, jak i słupowe). Przedsiębiorca stosujący stację transformatorową ICZ-E do zasilania swojego zakładu zużywa o ok. 20% mniej energii elektrycznej w stosunku do rozwiązania tradycyjnego.

Wewnętrzna stacja transformatorowa ICZ-E jest produkowana w typoszerzegu 100, 250, 400, 630, 800, 1000 kVA. Jest urządzeniem kompaktowym, mogącym zawierać w sobie cztery zintegrowane elementy tworzące jedną całość:

- rozdzielnicę SN,
- transformator żywicznym zgodny z rozporządzeniem (UE) 1783/2019,
- rozdzielnicę nn,
- baterię kondensatorów lub innych urządzeń pomocniczych.

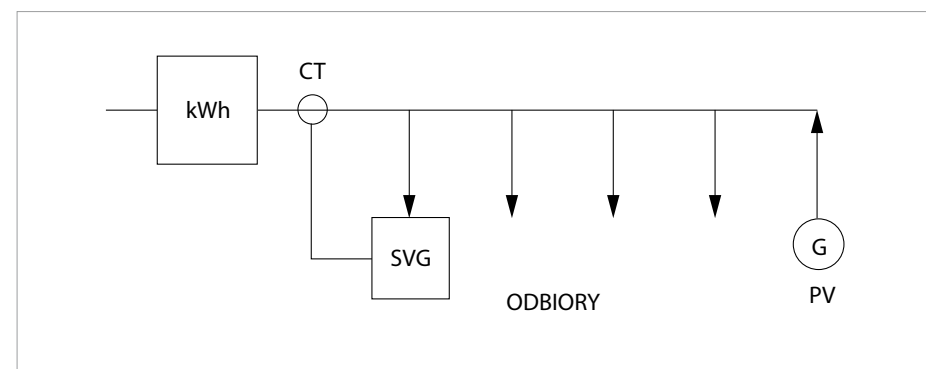
ZALETY WNĘTRZOWEJ STACJI TRANSFORMATOROWEJ ICZ-E:

- ICZ-E wymaga znacznie mniejszej ilości kabli nn oraz skróconej ich długości, co ma duże przełożenie na oszczędności energii.
- Zredukowanie do minimum odległości pomiędzy stacją

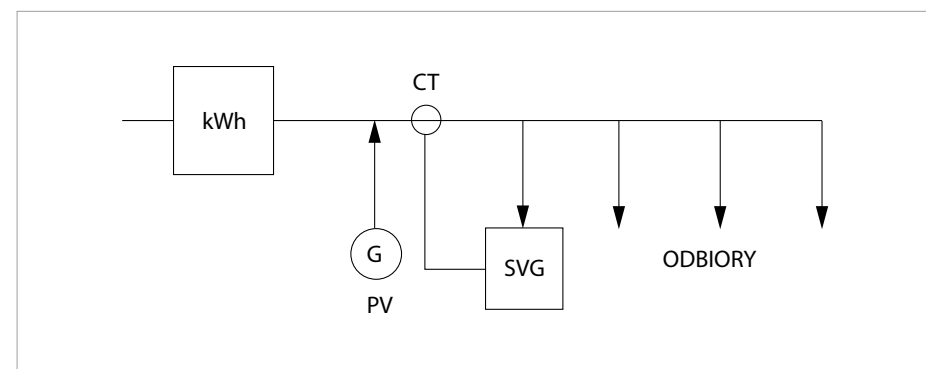
transformatorową a zakładem produkcyjnym, poprzez umieszczenie stacji transformatorowej wewnątrz hali produkcyjnej, tak aby znajdowała się jak najbliżej maszyn i urządzeń elektrycznych.

- Stacja transformatorowa ICZ-E ma przygotowane miejsca do przyłączenia zewnętrznych kanałów wentylacji wymuszanej (nawiewno-wywiewnej).
- Możliwość zabudowy układu SZR dla potrzeb zasilania rezerwowego oraz przyłączenia zespołu prądotwórczego.
- Opcjonalnie można wbudować zdalny monitoring z wizualizacją pracy stacji transformatorowej, tj. poboru mocy, zdalnego otwarcia/zamknięcia wyłącznika głównego, wyłączenia napięcia czy „zrzutu mocy”.
- Dzięki zastosowaniu nowoczesnych systemów sterowania ICZ-E może być nadzorowana zdalnie, dzięki czemu stacja jest praktycznie bezobsługowa. Jej obsługa sprowadza się do okresowych przeglądów i konserwacji.

Jakość stacji potwierdzona jest posiadanymi certyfikatami. Wewnętrzne stacje transformatorowe ICZ-E zostały opatentowane pod numerem 14690 w Unii Europejskiej. Wewnętrzne stacje transformatorowe ICZ-E realizują strategię dotyczącą efektywności energetycznej, która jest integralnym elementem pakietu znanego jako „Fit for 55” – gospodarka niskoemisyjna poprzez zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Zostały również wyróżnione godłem „Eko-Inspiracja 2013” w kategorii produkt.



Rys. 5. Podłączenie układu kompensacyjnego na początku, a źródła fotowoltaicznych na końcu (lub w środku) systemu zasilania rys. A. Książkiewicz



Rys. 6. Podłączenie źródeł fotowoltaicznych na początku, a układu kompensacyjnego w dalszej części systemu zasilania rys. A. Książkiewicz

Jakość energii elektrycznej – analiza oraz poprawa poprzez zastosowanie aktywnych filtrów wyższych harmonicznych

Stały rozwój techniki sprawia, że w życiu codziennym poza wieloma ułatwieniami, musimy również stawić czoło problemom, z którymi wcześniej się nie spotykaliśmy. Nie inaczej jest w sektorze elektroenergetyki. Wprowadzenie wciąż rosnącej liczby nowoczesnych urządzeń elektrycznych powoduje wzrost niepożądanych zjawisk związanych z sieciami elektrycznymi.

Urządzenia takie w znaczącej większości mają nieliniową charakterystykę prądowo-napięciową. Są to tak zwane odbiorniki nieliniowe. W swojej budowie zawierają układy, które pobierają prąd sieciowy, czyli taki o przebiegu sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz, następnie przetwarzają go na potrzeby urządzenia. W wyniku takich działań w naszej sieci elektrycznej poza prądem o częstotliwości podstawowej 50 Hz pojawiają się również przebiegi prądu o innych częstotliwościach. Prądy takie nazywamy wyższymi harmonicznymi i w negatywny sposób wpływają one na ostateczny przebieg prądu oraz napięcia w sieci elektrycznej.

W związku z występowaniem wyższych harmonicznych, możemy spotkać się z wieloma niepożądanymi zjawiskami, które wpływają nie tylko na urządzenia zainstalowane w naszej sieci, ale także na nasze bezpieczeństwo. Jednym z najbardziej niebezpiecznych problemów spowodowanych występowaniem wyższych harmonicznych jest nadmierne nagrzewanie się przewodów, co spowodowane jest faktem, iż przez przekrój przewodu poza składową podstawową prądu przepływają również prądy harmoniczne. W rzeczywistości przewód jest obciążony w znacznie większym stopniu, niż to zakładano projektując instalację.

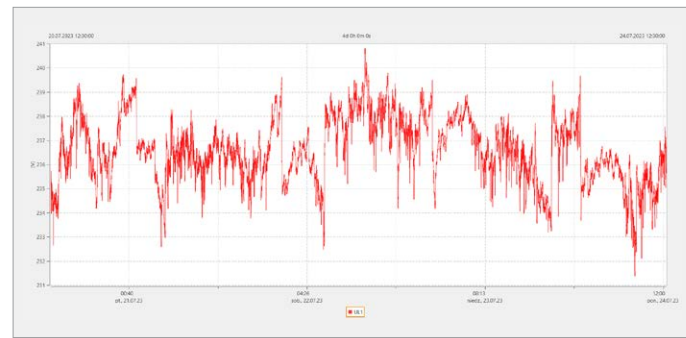
Wysoka temperatura może spowodować uszkodzenia izolacji, a w skrajnym przypadku nawet zapalenie się materiałów znajdujących się w pobliżu takiego przewodu. Innym zagrożeniem pojawiającym się podczas występowania harmonicznych w sieci elektrycznej mogą być niepożądane wyzwoleń aparatury ochronnych. Znacznie obniża to pewność zasilania, co w wielu obiektach jest kluczowe. Wyłączenia instalacji mogą spowodować straty w produkcji oraz w niektórych obiektach konieczność stosowania rezerwowych systemów zasilania. Nikt z nas nie chce doświadczyć wyłączenia zasilania w sytuacji, gdy jest nam ono niezbędne. Często obserwowana jest również skrócona żywotność urządzeń zasilanych z sieci o wysokim poziomie harmonicznych. Duża część urządzeń elektrycznych jest szczególnie wrażliwa na takie zjawiska. Jednym z przykładów takiego urządzenia może być tomograf, który do prawidłowego działania wymaga wysokiej jakości energii. Składowa harmoniczna rzędu 3. i jej wielokrotności sumują się w przewodzie neutralnym i przez przewód ten przepływa bardzo duży prąd, który w konsekwencji doprowadzić może do uszkodzenia przewodu, co stwarza duże niebezpieczeństwo dla odbiorników jednofazowych. Wysoki poziom harmonicznych wpływa również

na nadmierne nagrzewanie się transformatora oraz obniżenie jego żywotności, a także ogranicza wykorzystanie jego mocy. Przy niskiej jakości energii obserwowany jest również wysoki poziom mocy biernej.

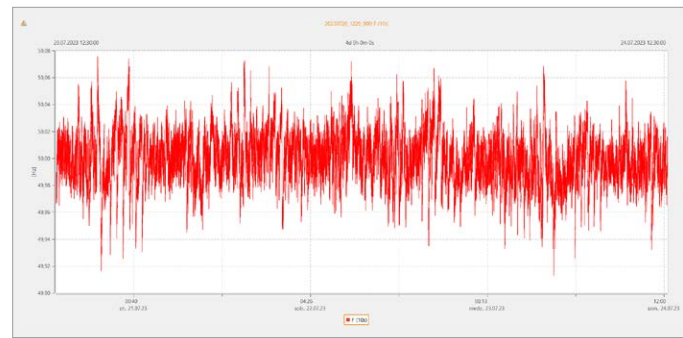
Za jakość energii w pierwszej kolejności odpowiedzialny jest nasz dostawca energii, na którego nałożone są wymagania zapisane w normie PN-EN 50160. Warto zauważyć jednak, że w większości przypadków to użytkownicy odpowiedzialni są za wprowadzanie do sieci zakłóceń harmonicznych. Po rozmowie z działem technicznym naszego dostawcy energii bardzo często otrzymamy odpowiedź, że dostarczana do nas energia spełnia zapisy normy. W takiej sytuacji należy przeprowadzić pomiary oraz analizę jakości energii po stronie odbiorcy. Na rynku istnieje wiele firm zajmujących się analizą jakości energii, jednak należy pamiętać, o tym, aby pomiar został przeprowadzony w odpowiedni sposób. Co to oznacza w rzeczywistości? Poprawnie przeprowadzona analiza jakości energii w budynku powinna zawierać następujące kroki:

Analiza wykresu napięcia

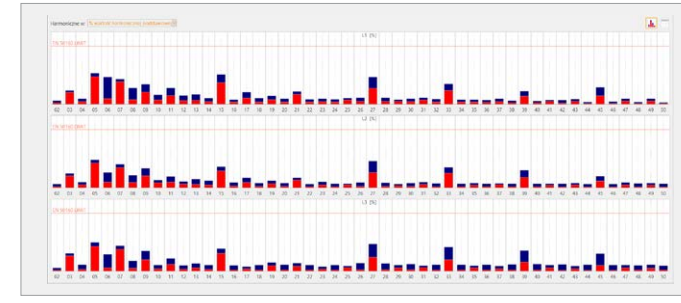
W tym punkcie należy zwrócić uwagę na ewentualne zapady napięcia oraz ogólny kształt



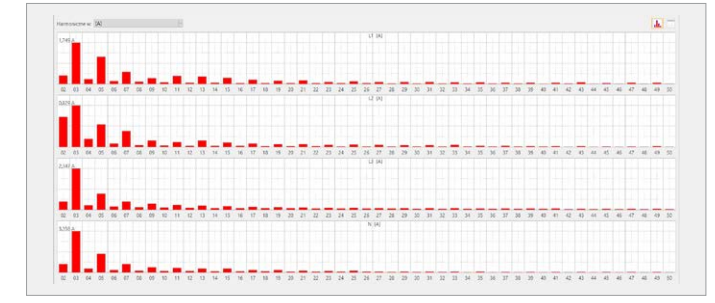
Rys. 1. Przebieg napięcia UL1



Rys. 2. Częstotliwość



Rys. 3. Harmoniczne w napięciu



Rys. 4. Harmoniczne w prądzie

przebiegu. Zgodnie zapisami normy PN-EN 50160 wartości napięcia powinny zawierać się w przedziale $\pm 10\% U_n$. Na rysunku 1. możemy zobaczyć przykładowy przebieg napięcia zarejestrowany podczas przeprowadzania pomiarów. Na podstawie tych danych można wywnioskować, że przebieg napięcia spełnia zapisy zawarte w normie.

Analiza częstotliwości

W przypadku analizy częstotliwości norma mówi, że 100% wartości musi zawierać się w przedziale $-6\%/+4\%$ wartości nominalnej. W przypadku naszego kraju nominalna wartość częstotliwości w sieci wynosi 50 Hz, zatem musi się ona zawierać w przedziale 47 – 52 Hz. Na rysunku 2. przedstawiono wyniki pomiarów częstotliwości. Możemy zauważyć, że podobnie jak w przypadku napięcia tu również spełnione są wymagania normy PN-EN 50160.

Wskaźnik migotania długookresowego

Wskaźnik, który bardzo często pomijany jest podczas analiz jakości energii. Jest on związany w chwilowymi zapadami napięcia, a jego zbyt wysoka wartość negatywnie wpływa nie tylko na pracę urządzeń w sieci, ale przede wszystkim na nasze samopoczucie. Gdy parametr nie spełnia zapisów normy ($<1\%$ dla 95% zmierzonych wartości), możemy zaobserwować takie dolegliwości, jak ból głowy, problemy z koncentracją, pogorszenie widzenia.

Moc bierna

W przypadku tego parametru nie ma zapisów normy, które mówiłyby o maksymalnym poziomie mocy biernej w sieci. Dostawcy energii elektrycznej określają w umowie poziom mocy biernej, po przekroczeniu którego naliczać będą dodatkowe koszty za jej generowanie. To my jako użytkownicy jesteśmy obciążeni tymi opłatami. Warto więc wykonać analizę i sprawdzić, w jaki sposób możemy obniżyć wartość tego parametru.

Wyższe harmoniczne

W ten sposób dochodzimy do jednego z bardziej niebezpiecznych parametrów w naszej sieci. Tak jak opisano we wcześniejszej części artykułu, to wyższe harmoniczne w dużej części wywołują wiele problemów, z którymi musimy borykać się w naszych sieciach. Na rysunkach 3. i 4. zobaczyć możemy poziom harmonicznych w prądzie oraz napięciu zarejestrowany podczas pomiarów trwających około tygodnia. Jak widzimy na rysunku 3., poziom harmonicznych w napięciu mieści się w zakresie opisanym w normie PN-EN 50160. W przypadku wyższych harmonicznych w prądzie (rys. 4.) sytuacja wygląda nieco inaczej. Już na pierwszy rzut oka widzimy, że niektóre harmoniczne (2., 3., 5., 7., 9.) są znacznie wyższe niż pozostałe. Jest to wywołane zainstalowanymi odbiornikami, które generują prąd harmoniczny do naszej sieci. W przedstawionym przypadku należy rozważyć zainstalowanie filtrów w celu obniżenia poziomu harmonicznych oraz poprawienia jakości energii.

Pozostałe parametry

Przedstawione w punktach 1-5 parametry nie są wszystkimi, które możemy sprawdzić podczas analizy jakości energii, jednak stanowią one podstawę, od której należy rozpocząć. Innymi parametrami mogą być np. asymetria napięcia, współczynnik mocy czy prąd skuteczny. Dzięki tak wykonanej analizie można wyciągnąć wnioski na temat jakości naszej energii i podjąć odpowiednie czynności, aby ją poprawić, gdy uznamy, że jest to konieczne.

Jednym z rozwiązań, coraz bardziej popularnym, są aktywne filtry harmonicznych. Są one bardzo skuteczne dzięki swojej budowie, która w dużym uproszczeniu zawiera moduły mocy oraz elektronikę pomiarowo-sterującą. Zadaniem takiego filtra jest monitorowanie w sposób ciągły poziomu wyższych harmonicznych w sieci przy użyciu przekładników pomiarowych oraz ich kompensacja. Uzyskiwana jest ona poprzez wprowadzenie do sieci przebiegów prądu o odpowiednich parametrach, aby wyeliminować

zakłócenia i sprawić, aby rzeczywisty przebieg prądu był jak najbardziej zbliżony do sinusoidy. Dzięki temu prąd o wysokim poziomie harmonicznych zamyka się w obwodzie odbiornika-filtra i nie wpływa negatywnie na pozostałe urządzenia. Przy doborze aktywnego filtra harmonicznych kluczowe jest prawidłowe wykonanie pomiarów. Ważne jest, aby w tym celu stosować analizatory parametrów sieci o wysokiej klasie. Nie mniej ważne jest dobranie odpowiedniego czasu wykonywania pomiarów. Dane pomiarowe należy zbierać w czasie, gdy nasza sieć jest mocno obciążona. Najczęściej za okres pomiarów przyjmuje się od kilku do kilkunastu dni, tak aby podczas analizy danych można było znaleźć najbardziej skrajne wartości poszczególnych parametrów. Sam filtr również dobierany jest do najwyższych wartości, tak aby nie zabrakło nam mocy na kompensację wyższych harmonicznych w czasie maksymalnych obciążeń.

Innym, równie popularnym rozwiązaniem są aktywne kompensatory mocy biernej. Urządzenia typu SVG (Static VAR Generator), podobnie jak aktywne filtry harmonicznych, w sposób ciągły monitorują naszą sieć za pomocą przekładników, dostosowując swoją moc kompensacji do aktualnego poziomu mocy biernej. Niektóre aktywne kompensatory mają również możliwość kompensacji kilku podstawowych częstotliwości prądów harmonicznych. Mogą one być stosowane jako nieco budżetowe rozwiązanie w przypadku, gdy nie jest wymagana kompensacja harmonicznych wyższych rzędów.

Podsumowując rozważania przedstawione w artykule chciałbym zaznaczyć, że problem związany z niską jakością energii jest bardzo powszechny i nie należy go bagatelizować. Zła jakość energii to nie tylko występowanie mocy biernej, ale przede wszystkim wyższe harmoniczne, które w znaczący sposób wpływają na nasze bezpieczeństwo. Gdy więc obserwujemy niepokojące nas zjawiska, występujące w naszej sieci, należy rozważyć wykonanie analizy jakości energii w celu zbadania ich źródła i doboru rozwiązania, które poprawi nasze bezpieczeństwo.

Poprawa jakości energii i eliminacja zaburzeń elektroenergetycznych

We wszelkich obszarach działalności człowieka powszechnie wykorzystywane są urządzenia elektryczne. Dla zapewnienia ich prawidłowej pracy niezbędne jest dostarczenie im energii elektrycznej o ściśle określonych parametrach. Podstawowymi parametrami określającymi jakość energii elektrycznej są: wartość i częstotliwość napięcia, odkształcenia przebiegu napięcia (odkształcenia od przebiegu sinusoidalnego) oraz ciągłość zasilania. Jakość energii elektrycznej bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo, niezawodność i poprawność funkcjonowania zasilanych urządzeń, jak też na ciągłość realizacji procesów produkcyjnych.

Do najczęściej występujących zaburzeń w sieciach elektroenergetycznych należą: zaniki napięcia (krótkotrwałe bądź długotrwałe), wahania wartości napięcia (wzrosty lub zapady napięcia), przebiegi (krótkotrwałe impulsy wysokonapięciowe), wahania częstotliwości napięcia oraz odkształcenia przebiegu napięcia (wyższe harmoniczne). Wraz z rozwojem osprzętu elektrycznego, elektronicznego i informatycznego wzrasta niebezpieczeństwo powstawania i oddziaływania zaburzeń.

Typ oraz charakter powstających i oddziałujących zaburzeń zależy od wykorzystywanych urządzeń. Układy, w których zachodzą częste stany łączeniowe elementów biernych (cewek i kondensatorów) mogą mieć tendencję do generowania przepięć (powstających w stacjach przejściowych), szczególnie groźnych dla pracy podzespołów elektronicznych (półprzewodnikowych). Występujące w układach elementy o silnych nieliniowościach sprzyjają powstawaniu odkształceń sygnałów napięciowych i prądowych (generowaniu wyższych harmonicznych). Odkształcenia przebiegu napięciowego niekorzystnie wpływają na pracę urządzeń. Mogą powodować powstawanie dodatkowych strat mocy, przegrzewanie się podzespołów oraz przewodów neutralnych oraz przedwczesne starzenie się urządzeń.

Pewność i jakość dostarczanej do odbiorców energii można zwiększyć za pomocą różnych środków technicznych. Jednym ze sposobów poprawy jakości i pewności zasilania elektrycznego jest wykorzystanie systemów zasilania gwarantowanego z podwójnym przetwarzaniem energii (UPS on-line), na przykład UPS EVER POWERLINE GREEN 33 PRO. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania osiąga się:

- » poprawę wartości, częstotliwości i kształtu napięcia dostarczanego do zabezpieczanych odbiorców, co korzystnie wpływa na ich warunki funkcjonowania,
 - » wyeliminowanie oddziaływania przenoszonych przez przewodzenie zaburzeń sieciowych (powstających w wyniku podłączenia do wspólnej sieci przez innych odbiorców obciążeń nieliniowych, niesymetrycznych bądź wielokrotnie przełączanych),
 - » wzrost pewności, niezawodności dostarczania do odbiorców energii elektrycznej o określonej jakości (również w przypadkach zaników zasilania sieciowego).
- Wszystkie te elementy wpływają bezpośrednio na poprawę jakości i niezawodności zasilania elektrycznego zabezpieczanych odbiorców, a zatem na poprawę bezpieczeństwa. Ważne jest również to, że energia dostarczana w czasie normalnej pracy (sieciowej) przez UPS (on-line) do odbiorców jest lepszej jakości niż energia sieciowa, a zatem systemy zasilania gwarantowanego poprawiają warunki pracy zasilanych urządzeń, a dodatkowo ograniczają ich negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą.



UPS EVER POWERLINE GREEN 33 PRO dzięki możliwości podwójnego przetwarzania energii (separacji energetycznej) pozwala na generowanie na wyjściu jednostki napięcia o najwyższej jakości parametrach VFI-SS-111. UPS EVER dzięki swoim funkcjonalnościom umożliwia także redukcję kosztów zasilania



EVER Sp. z o.o.
60-003 Poznań, ul. Wołczyńska 19
tel. 61 650 04 00
faks 61 651 09 27
zapytanie@ever.eu
www.ever.eu



SYSTEMY ZASILANIA GWARANTOWANEGO

Oferta produktowa firmy Riello Delta Power Sp. z o.o.

- zasilacze UPS Riello od 400 VA do 6.4 MVA mocy,
- agregaty prądotwórcze od 9 kVA do 12 MVA mocy,
- zasilacze dynamiczne,
- łączniki statyczne,
- oprogramowanie i akcesoria

W zakresie naszych usług znajdują Państwo:

- tworzenie koncepcji zasilania gwarantowanego obiektów,
- kompletne wielobranżowe projekty systemów zasilania,
- integrowanie systemów zasilania gwarantowanego,
- montaż systemów UPS oraz agregatów prądotwórczych,
- zdalne nadzorowanie systemów zasilania rezerwowego,
- profesjonalny serwis,
- opieka posprzedażowa, umowy serwisowe, hot-line 24/7/365

Riello Delta Power Sp. z o.o.

Siedziba WARSZAWA:

ul. Krasnowolska 82 R
02-849 Warszawa
tel. 22 37 91 700
faks 22 37 91 701
serwis: 22 37 91 720
e-mail: biuro.warszawa@deltapower.pl
serwis.warszawa@deltapower.pl

Filia GDYNIA:

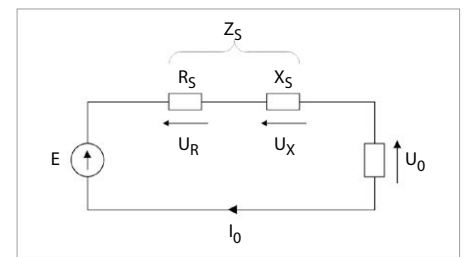
ul. Olgierda 137
81-584 Gdynia
tel. 58 668 01 88, 89
faks 58 668 00 47
e-mail: biuro.gdynia@deltapower.pl
serwis.gdynia@deltapower.pl

Kompensacja mocy biernej w obwodach z asymetrią obciążenia

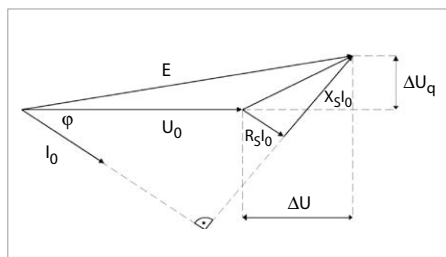
Występowanie asymetrii obciążenia prowadzi do pojawienia się dodatkowych negatywnych zjawisk w układach zasilających, związanych przede wszystkim z problemem kompensacji mocy biernej. Stosowanie tradycyjnego układu kompensacyjnego może nie być rozwiązaniem właściwym. Wykorzystanie statycznych generatorów mocy biernej pozwala na realizację kompensacji w układach z asymetrią obciążenia. W artykule przedstawione zostały wyniki pomiarów w obiekcie biurowym, w którym był zainstalowany kompensator SVG. Wykazano, że urządzenie pozwala na skuteczną kompensację mocy biernej przy asymetrycznym obciążeniu i jednocześnie symetryzuje obciążenie oraz redukuje wyższe harmoniczne prądu.

Zasilanie obiektów przy asymetrycznym obciążeniu

Poprawna praca urządzeń elektrycznych wymaga pobierania z sieci zasilającej mocy biernej. Często w zakładach przemysłowych stosuje się odbiorniki trójfazowe, które charakteryzują się symetrycznym poborem mocy. Występują jednak również odbiorniki jedno- lub dwufazowe zasilane z tej samej sieci. Powoduje to pojawienie się asymetrii w zakresie obciążenia układu elektroenergetycznego. Dla odbiorców komunalnych, wszelkiego rodzaju obiektów biurowych, hoteli, sklepów i innych należałoby wręcz założyć, że obciążenie będzie nierównomiernie rozłożone na poszczególne fazy. Prowadzi to do wystąpienia problemu z kompensacją mocy biernej, realizowanej przez typowe układy kompensacyjne oparte na bateriach kondensatorów. Analiza zagadnienia wykazuje, że niewłaściwe oszacowanie punktu pomiaru prądu może prowadzić do niewłaściwego skompensowania układu zasilania, tym samym do naliczenia dodatkowych opłat karnych [1, 2]. Asymetryczne obciążenie będzie również wpływało na występowanie spadku napięcia. Będzie prowadziło do występowania na każdej fazie różnych poziomów wartości skutecznej napięcia. Przyłączenie nowego odbiorcy w obszarze sieci z asymetrią zasilania, wynikającą z charakteru obciążenia, będzie już na wejściu pogarszało warunki pracy jego urządzeń. Wartość skuteczna napięcia zasilającego w sieciach rozdzielczych i instalacjach elektroenergetycznych jest jednym z najważniejszych parametrów określających jakość zasilania. Wartość napięcia musi spełnić określone wymagania jakościowe zawarte między innymi w Rozporządzeniu [3], które określa dopuszczalne odchylenia w stosunku do wartości znamionowej. Dla sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia wymagane jest, aby w każdym tygodniu 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego powinno mieścić się w przedziale odchylenia $\pm 10\%$ napięcia znamionowego. Rozporządzenie to bazuje na zapisach Normy [4], która określa większą liczbę parametrów jakościowych napięcia. W systemie elektroenergetycznym możliwa jest regulacja wartości skutecznej napięcia poprzez zmianę zaczepów transformatorów lub poprzez zmianę bilansu mocy biernej. Regulacja ta jednak pozwala tylko na jednoczesną zmianę zaczepu dla wszystkich faz, tym samym nie jest możliwa do zastosowania dla każdego odcinka sieci. Dodatkowo poziom asymetrii będzie zmienny w czasie, gdzie w dni robocze może występo-



Rys. 1. Uproszczony schemat elektryczny do wyznaczenia wartości straty napięcia rys. A. Książkiewicz



Rys. 2. Wykres wektorowy napięć dla schematu z rysunku 1. rys. A. Książkiewicz

wać znaczny jej poziom, a podczas dni wolnych nie będzie ona stanowiła większego problemu. Możliwa jest regulacja w sieciach niskiego napięcia poprzez włączenie dodatkowych urządzeń regulujących, które pozwalają na pracę w układach z asymetrią [5].

Spadek napięcia uzależniony od mocy biernej

Przepływ prądu elektrycznego przez tory prądowe prowadzi do wystąpienia spadku napięcia. Spadek ten jest uzależniony od rzeczywistej wartości skutecznej prądu oraz od wartości rezystancji i reaktancji elementów przesyłowych (rys. 1.). Należy rozróżnić stratę napięcia (wzór 1), będącą różnicą geometryczną napięcia na końcu i początku linii, od spadku napięcia (wzór 2), który określa tylko różnicę arytmetyczną [6, 7]. Zależność ta może być przedstawiona na wykresie wektorowym (rys. 2.). Różnica geometryczna między wektorami E oraz U_0 jest właśnie stratą napięcia. Strata ta jest uzależniona, zgodnie ze wzorem 1, od przesyłu mocy czynnej i biernej przez elementy rezystancyjne i indukcyjne w torze prądowym. Dla niewielkich wartości kąta między tymi wektorami można przyjąć, że różnica ta jest praktycznie równa spadkowi napięcia, zgodnie ze wzorem 2. Istotny wpływ na możliwość korzystania ze wzoru uproszczonego będą miały wartości R_S oraz X_S toru prądowego. Przy dominującym udziale re-

zystancji przesunięcie kątowe między wektorami E i U_0 będzie niewielkie. W układach zasilających zakłady przemysłowe, gdzie stosowane są jednostki transformatorowe dużych mocy oraz przewody, kable i szynoprzewody o znacznych przekrojach, dominująca może okazać się wartość reaktancji indukcyjnej X_S .

$$\delta U = \frac{PR + QX}{U_n} + j \frac{PX - QR}{U_n} \quad (1)$$

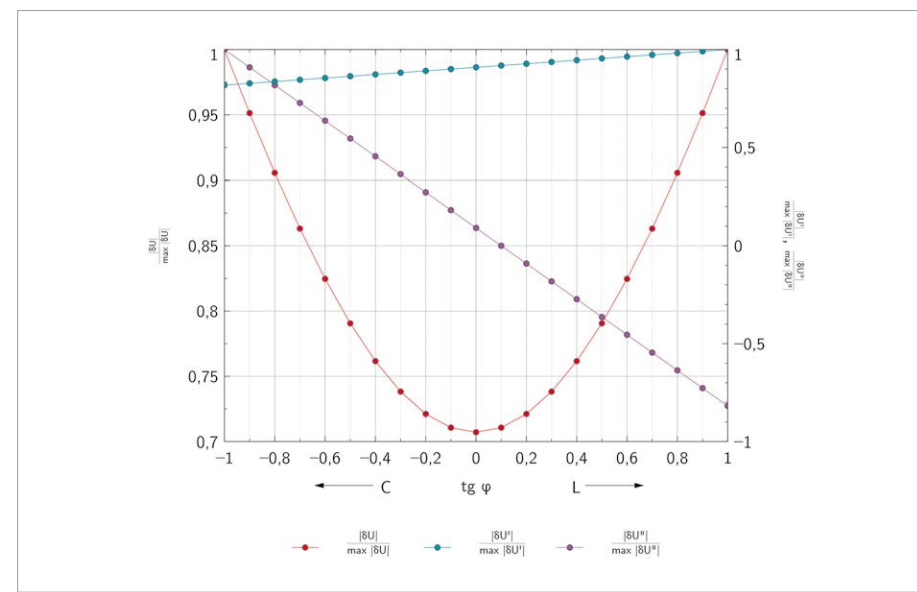
$$\Delta U \approx \frac{PR + QX}{U_n} \quad (2)$$

Na podstawie powyższych rozważań, wyraźnie widać, że na wartość spadku napięcia, istotny wpływ mają takie czynniki jak reaktancja indukcyjna toru prądowego oraz wartość przesyłanej mocy biernej. Na wypadkową wartość spadku napięcia pośrednio ma więc wpływ wartość współczynnika $\tan \phi$ (rys. 3.). Najniższa wartość straty napięcia, a tym samym najmniejszy błąd popełniany przy obliczaniu spadku napięcia, jest przy wartości $\tan \phi$ równej zero. Im bardziej wartość tego współczynnika rośnie, niezależnie czy w kierunku charakteru indukcyjnego czy pojemnościowego odbiornika, rośnie wypadkowa strata napięcia.

Należy zauważyć, że powyższe rozważania wyprowadzone są dla sieci z symetrycznym zasilaniem, a więc i z symetrycznym poborem mocy przez odbiorniki. Jeżeli wystąpi asymetria obciążenia, sytuacja może wyglądać odmiennie dla każdej z faz. Może wystąpić również sytuacja, gdzie na jednej lub dwóch fazach nastąpi pobór mocy biernej o charakterze pojemnościowym, a na pozostałych o charakterze indukcyjnym.

W obwodach zasilających może wystąpić sytuacja, gdzie reaktancja obwodu będzie miała większą wartość niż rezystancja. Tym samym to zmiany poboru mocy biernej mogą mieć porównywalny, a nawet większy wpływ na wypadkową wartość wahań napięcia niż zmiany mocy czynnej. Z tego powodu jednym z możliwych i skutecznych środków zmniejszenia wahań napięcia jest zastosowanie kompensacji mocy biernej.

Kompensacja ta musi uwzględniać jednak dodatkowe wymagania, aby mogła być skuteczna. Do wymagań tych należy zaliczyć między innymi poziom asymetrii obciążenia. Pozwoli to na odciążenie wszystkich elementów obwodu zasilającego dany odbiornik. Możliwy wybór tak naprawdę zawęża się do urządzeń typu STATCOM/SVG, a więc energoelektronicznych generatorów mocy biernej. Pozwalają one



Rys. 3. Względna zmiana wartości straty napięcia w funkcji współczynnika $\tan \phi$, gdzie: $\delta U'$ – część rzeczywista straty napięcia, $\delta U''$ – część urojona straty napięcia rys. A. Książkiewicz

na prawie bezzwłoczną, nadążną kompensację mocy biernej w układach z asymetrią obciążenia.

Statyczne generatory mocy biernej

Typowe układy kompensujące, oparte na bateriach kondensatorowych lub dławikowych sterowanych klasycznymi stycznikami, a nawet poprzez układy tyrystorowe, nie są w stanie zapewnić właściwych parametrów jakości energii, przy kompensacji mocy biernej w układach, gdzie występuje nieównomierne obciążenie faz. Rozwiązaniem, jakie można tutaj zaproponować, są statyczne generatory mocy biernej, tzw. SVG (rys. 6.). Są to urządzenia energoelektroniczne, wykorzystujące do swojego działania układy tranzystorów IGBT (rys. 7.), które kłuczując wg określonego algorytmu regulacji, łącząc kondensator i w ten sposób generując przepływ mocy biernej [8].

Układy kompensacyjne SVG pozwalają na kompensację mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej w jednym urządzeniu, symetryzację obciążenia, praktycznie nieograniczoną liczbę cykli łączeniowych. Urządzenia te zapewniają również uzupełniającą filtrację wyższych harmonicznych prądu do trzynastego rzędu, a dzięki ciągłej kontroli pobieranego prądu nie zachodzą zjawiska rezonansowe.

Kompensatory SVG pozwalają na nadążną kompensację, niezależną dla każdej z faz, co umożliwia ograniczenie zapotrzebowania na moc bierną także w układach, gdzie dynamika zmian obciążenia jest znaczna. Przy czasie odpowiedzi na zmiany zapotrzebowa-

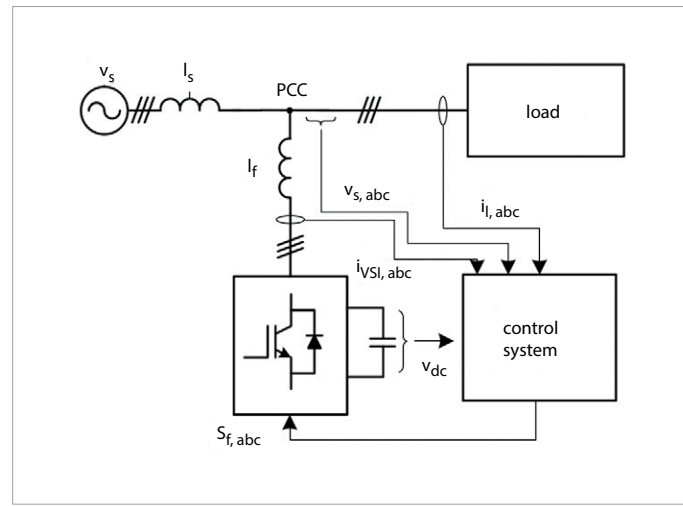
nia nie dłuższym niż 1 ms generowana moc bierna dostarczana jest do odbiornika płynnie, praktycznie bez obciążania układu zasilającego. Dodatkowo urządzenia pozwalają na generację mocy biernej o charakterze pojemnościowym lub indukcyjnym, co ma zastosowanie w zakładach, gdzie, np. w porze nocnej lub w dni wolne od pracy, charakter zapotrzebowanej mocy biernej zmienia się z indukcyjnego na pojemnościowy. Zastosowanie energoelektronicznych układów łączących pozwala na prawie nieograniczoną liczbę cykli łączeniowych. Dla porównania, styczniki łączeniowe w bateriach kondensatorów pozwalają na ok. 100 przełączeń w ciągu godziny i około 100 tys. do 400 tys. łączy elektrycznych w cyklu życia produktu (zależnie od modelu i producenta).

Działanie kompensatorów SVG w układach z asymetrią obciążenia

Przeprowadzone zostały pomiary parametrów jakości energii elektrycznej na zasilaniu budynku biurowego. Pobór mocy czynnej przez 95% czasu nie przekracza wartości 20 kW, osiągając w szczycie poziom niespełna 25 kW. Pobór mocy biernej o częstotliwości 50 Hz (harmoniczna podstawowa) zmienił się w zakresie od 5,68 kVar do – 3,95 kVar. Świadczy to o poborze mocy biernej o charakterze pojemnościowym i indukcyjnym, w różnych przedziałach czasu. Na rysunku 6. przedstawiono częstości poboru mocy biernej harmonicznej podstawowej dla poszczególnych faz. Można zauważyć, że pobór



Rys. 4. Widok zewnętrzny kompensatora SVG, model ASTec, o mocy 50 kVAR
fot. A. Książkiewicz



Rys. 5. Schemat blokowy statycznego generatora mocy biernej [9]

mocy, o różnym charakterze, jest inny dla każdej z faz.

W układzie zasilającym był zamontowany kompensator typu SVG ASTec o mocy 25 kVAR. Pomiar prądu wykonywany był w każdej fazie przekładnikami prądowymi o przekładni 60/5, mocy 5 VA i klasie 0,5. Kompensacja wykonywana była przy założeniu współczynnika mocy

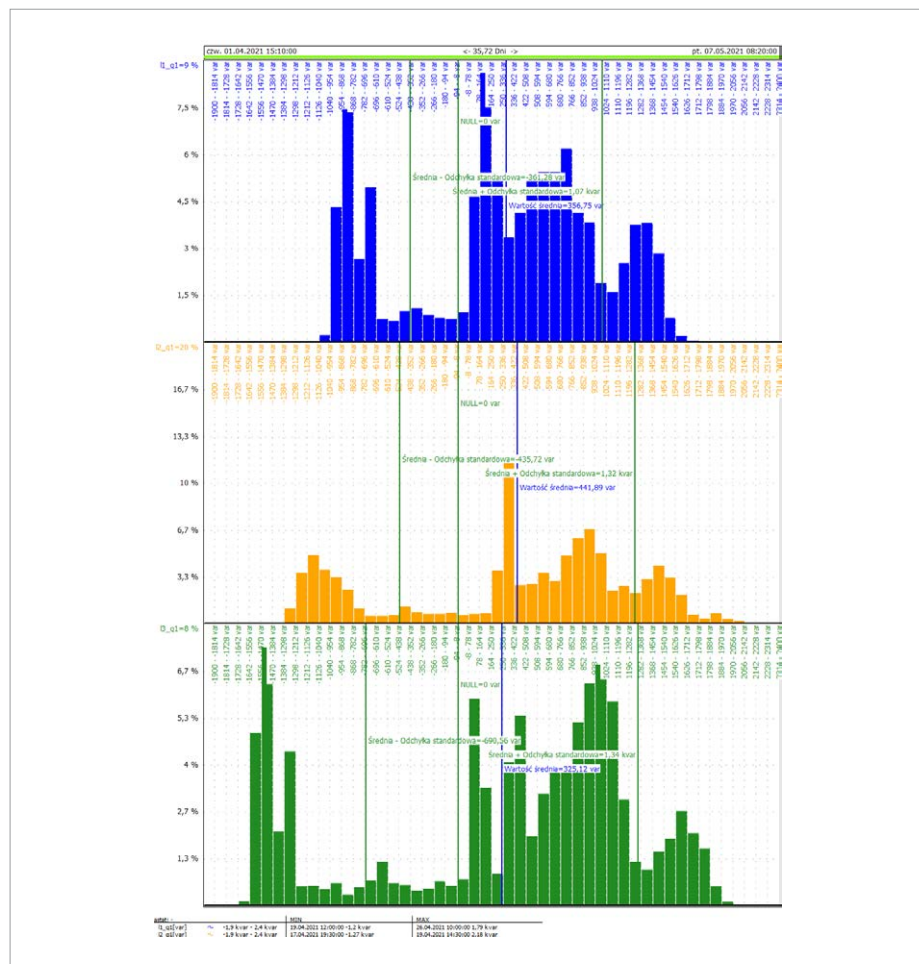
na poziomie 0,98, przy równoczesnej redukcji wybranych wyższych harmonicznych prądu rzędów trzeciego, piątego, siódmego i jedenastego. Kompensator przeprowadzał również symetryzację obciążenia. Wykonano planowe wyłączenie kompensatora, w celu porównania parametrów przed i w trakcie kompensacji. W szczególności zwrócono uwagę na wartość

współczynnika mocy $\cos \phi$ oraz pobór mocy biernej harmonicznej podstawowej Q_v . Dodatkowo oceniono zmiany wartości całkowitego współczynnika odkształcenia prądu THD_i, ze szczególnym uwzględnieniem trzeciej oraz piątej harmonicznej, których pobór dominował w całym spektrum wyższych harmonicznych prądu. Na przedstawionych wykresach pionową linią czerwoną zaznaczono moment wyłączenia układu SVG. Wszelkie wartości wskazanych wielkości od początku wykresu do tej linii zostały zarejestrowane przy załączonym kompensatorze.

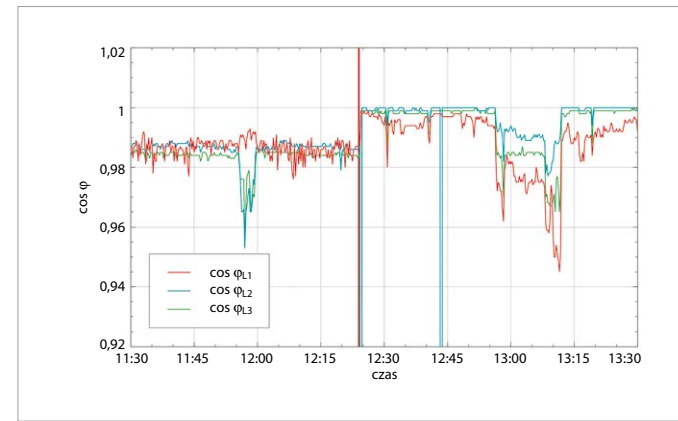
Na **rysunku 7.** przedstawiono zmienność wartości współczynnika mocy $\cos \phi$ dla każdej z faz oddzielnie. Zauważyć można, że podczas działania układu udawało się utrzymać wartość tego współczynnika w zakresie wartości od 0,98 do 0,99, charakter pobieranej mocy pozostawał indukcyjny. Wystąpiło jedno krótkotrwałe wahanie jego wartości, związane zapewne z załączeniem jakiegoś odbiornika. Przy czym nawet w takiej sytuacji udało się utrzymać wartość współczynnika mocy na poziomie nie gorszym niż 0,95.

Po wyłączeniu kompensatora nastąpiła zmiana wartości współczynnika mocy $\cos \phi$ dla każdej z faz. Dla fazy L2 (kolor niebieski na wykresie) pojawiły się przedziały czasu, kiedy nastąpił pobór mocy o charakterze pojemnościowym, choć o niewielkiej wartości. Przedziały te widoczne są w postaci wychodzącej w dół poza wykres linii. Dla każdej z faz układu zaczyna się uwidaczniać inna wartość współczynnika mocy, gdzie dla fazy L1 utrzymuje się on na poziomie bliskim jedności.

Pobór mocy biernej harmonicznej podstawowej (**rys. 8.**) wskazuje na w miarę równomierną pracę układu, przy stałym poziomie generacji mocy na poziomie ok. 1000 VAR. Przy braku kom-



Rys. 6. Histogram zapotrzebowania mocy biernej harmonicznej podstawowej dla poszczególnych faz obwodu
rys. A. Książkiewicz



Rys. 7. Wykres zmienności współczynnika mocy $\cos \phi$, dla trzech faz, przy działającym kompensatorze i po jego wyłączeniu (linia czerwona)
rys. A. Książkiewicz



Rys. 8. Wykres zmienności poboru mocy biernej składowej podstawowej 50 Hz (Q_v), dla trzech faz, przy działającym kompensatorze i po jego wyłączeniu (linia czerwona)
rys. A. Książkiewicz

pensacji następują częste zmiany poboru mocy biernej, zarówno stronę wartości wyższych, jak i niższych. Zauważyć można również różne pobory mocy dla każdej z faz, gdzie faza L2 charakteryzuje się niższymi wartościami poboru, a faza L1 wyższymi wartościami poboru mocy.

Przeanalizowano również wpływ kompensatora SVG na wartość całkowitego współczynnika odkształcenia prądu THD_i (**rys. 9.**). Przy działającym urządzeniu wartość tego współczynnika zawiera się w przedziale od 5% do 10% dla każdej z faz. Po wyłączeniu następuje wzrost odkształcenia krzywej prądu i wartości THD_i, osiąga poziom od 10% do ok. 23%. Równocześnie, ze względu na asymetrię obciążenia, wartości te są różne dla każdej z faz w dowolnej chwili czasowej. Pobór prądu harmonicznej trzeciej i piątej przedstawiono na **rysunkach 10. i 11.** W obu przypadkach, po wyłączeniu SVG, następuje wzrost wartości prądu. Oznacza to, tak jak wspomniano wcześniej, wzrost odkształcenia krzywej prądu.

Powyższa analiza pozwala sformułować następujące wnioski. Przy układach z asymetrycznym obciążeniem kompensator SVG pozwala na utrzymanie wymaganej wartości współczynnika mocy biernej $\cos \phi$ dla każdej z faz niezależnie. Nie występują nawet chwilowe pobory

mocy biernej o charakterze pojemnościowym. Następuje również symetryzacja obciążenia, co może być istotne w układach sieciowych zasilanych z transformatora znajdującego się po stronie odbiorcy. Równocześnie zredukowane zostało odkształcenie krzywej prądu, co za tym idzie ograniczono negatywne skutki przepływu wyższych harmonicznych przez elementy układu zasilającego.

Podsumowanie

Występowanie asymetrii obciążenia w układach elektroenergetycznych i sieciach dystrybucyjnych prowadzi do występowania dodatkowych problemów, w tym między innymi występowania asymetrii napięciowej układu. Tradycyjne układy kompensacyjne nie zawsze będą w stanie poradzić sobie przy takim obciążeniu. Zastosowanie kompensatorów w postaci Statycznych Generatorów Mocy Biernej pozwala na równoczesną odpowiedź na wiele problemów związanych z gospodarką mocą bierną w obiekcie. Możliwa jest kompensacja mocy biernej zarówno o charakterze indukcyjnym, jak i pojemnościowym dla każdej z faz niezależnie. Równoczesna symetryzacja obciążenia będzie przyczyniała się do dalszej poprawy wskaźników jakościowych zasilania. Redukcja

wyższych harmonicznych prądów prowadzić będzie do dalszego wzrostu jakości energii elektrycznej w układzie zasilającym. Jednocześnie urządzenie to charakteryzuje się mniejszymi gabarytami w porównaniu do tradycyjnych układów kompensacji.

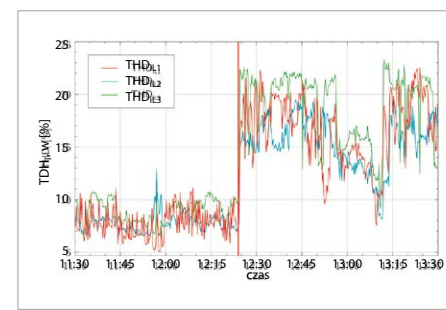


ABSTRACT

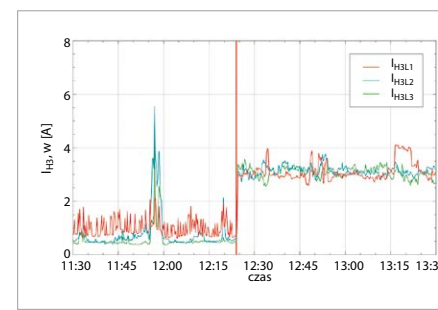
Reactive power compensation in circuits with load asymmetry

The occurrence of load asymmetry leads to the appearance of additional negative phenomena in the supply system, related primarily to the problem of reactive power compensation. Using a traditional compensation system may not be the right choice. The use of static var generators allows for compensation in systems with load asymmetry. The results of measurements in an office building where the SVG compensator was installed are presented. It has been shown that the device allows for effective reactive power compensation with asymmetric load and at the same time symmetries the load and reduces the higher current harmonics.

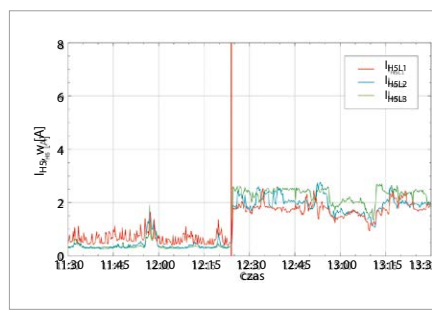
Keywords: power compensation, SVG, STATCOM, non-linear loads, asymmetry.



Rys. 9. Wykres zmienności współczynnika całkowitego odkształcenia prądu THD_i, dla trzech faz, przy działającym kompensatorze i po jego wyłączeniu (linia czerwona)
rys. A. Książkiewicz



Rys. 10. Wykres zmienności przepływu składowej trzeciej harmonicznej prądu, dla trzech faz, przy działającym kompensatorze i po jego wyłączeniu (linia czerwona)
rys. A. Książkiewicz



Rys. 11. Wykres zmienności przepływu składowej piątej harmonicznej prądu, dla trzech faz, przy działającym kompensatorze i po jego wyłączeniu (linia czerwona)
rys. A. Książkiewicz

Efektywność energetyczna przemysłu i przedsiębiorstw

Ze względu na coraz wyższe koszty energii, ryzyko blackoutu, chęć redukcji emisji CO₂, coraz więcej przedsiębiorstw staje przed wyzwaniem redukcji i optymalizacji zużycia energii. Nie jest to proste zadanie i nie ma uniwersalnej receptury, jak to zrobić, ale poniżej postaram się przybliżyć nieco tę tematykę i opisać kilka przykładów optymalizacji kosztów energii i powodów, dla których warto jest to robić.

Przykłady optymalizacji zużycia energii w przemyśle

Zazwyczaj proces produkcyjny jest złożony i składa się na niego wiele urządzeń i części. Ta złożoność sprawia, że dla każdej instalacji czy procesu istnieje wiele dróg prowadzących do zwiększenia efektywności energetycznej. Czasami przesunięcie konsumpcji energii w czasie lub równomierne rozłożenie obciążenia potrafi skutkować zmniejszeniem kosztów energii. Przekroczenie zadeklarowanej mocy umownej przez zakład jest kosztowne i potrafi podnieść rachunek za prąd. Przykładem takiej optymalizacji jest sytuacja, gdzie w ciągu dnia w zakładzie produkcyjnym przekraczana jest moc umowna, ale w nocy pobór energii jest znacznie mniejszy. W takim przypadku należy się zastanowić, pracę których obciążeń można przesunąć w mniej energochłonny okres. Przykładem może być praca sprężarki, odpowiadającej za dostarczenie odpowiedniego ciśnienia w sieci pneumatycznej. Jeśli jej praca została przesunięta na okres nocny, a dodatkowo zwiększona została objętość zbiorników sprężonego powietrza,

to udałoby się zredukować pracę sprężarki w ciągu najbardziej energochłonnego czasu pracy zakładu.

W przetwórstwie tworzyw sztucznych, hutach szkła, produkcji papieru i w innych zakładach o podobnym charakterze pracy, zużycie energii elektrycznej bywa bardzo wysokie. Maszyny takie jak autoklawy, piece elektryczne i silniki elektryczne pochłaniają czasem ogromne ilości energii, liczonej w setkach kilowatów. Warto się przyjrzeć harmonogramowi pracy takich urządzeń, ponieważ potencjał oszczędności jest w nich bardzo duży. Może się okazać, że urządzenie często ma przestoje, np. w oczekiwaniu na nowy wsad materiału – czyli obiekt nie jest produktywny, a jednocześnie zużywa dużo energii. Modyfikacja planu pracy lub eliminacja przestojów mogą przynieść konkretne oszczędności.

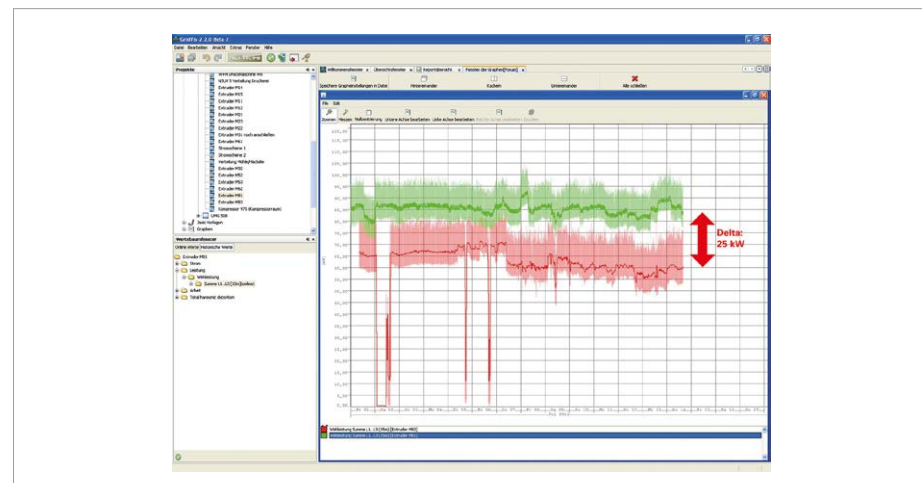
W starszych zakładach produkcyjnych często znajdziemy sporo wiekowych urządzeń, których pracę można w dosyć prosty sposób zoptymalizować. Np. wymiana silników elektrycznych na takie o większej sprawności jest pierwszym, co nasuwa się na myśl. Innym sposobem jest zastosowanie



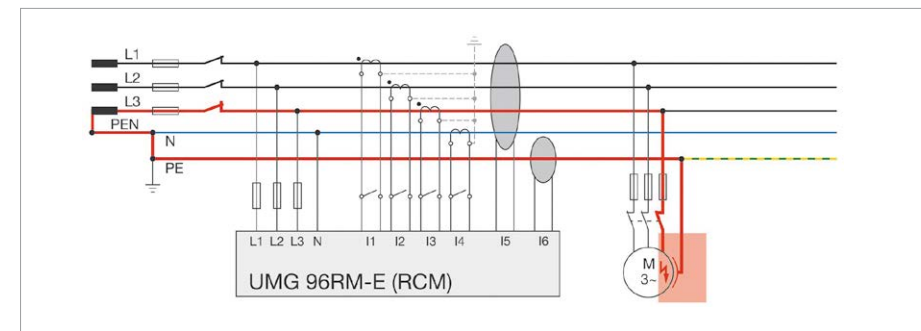
Efektywność energetyczna przemysłu to coraz bardziej istotna kwestia w polskich przedsiębiorstwach

urządzeń kontrolujących pracę silników elektrycznych, np. falowników. W sytuacji, gdzie obciążenie silnika jest zmienne, a pracuje on bez regulacji, podłączony bezpośrednio do sieci, to wdrożenie takiego systemu obniży zużycie energii – ponieważ silnik będzie pobierał jej tyle, ile rzeczywiście potrzebuje w danym momencie. Jeśli wdrożyć takie sterowanie we wszystkich silnikach ze zmiennym obciążeniem, to całkowite oszczędności mogą okazać się na tyle wysokie, że stosunkowo duży koszt początkowy inwestycji szybko się zwróci. Im większa kontrola nad danym procesem, tym łatwiej jest zarządzać jego poszczególnymi elementami, a więc i optymalizować zużycie energii.

Aby w ogóle widzieć realne zużycia energii zakładu, czy całego przedsiębiorstwa warto rozważyć system zarządzania energią (EnMS). Taki system pozwala monitorować w czasie rzeczywistym jej aktualne zużycie, zapisywać pomiary do bazy danych, tworzyć trendy historyczne, generować różne raporty itp. Takie narzędzie pozwala na łatwiejszą identyfikację miejsc, w których energia ucieka w największej ilości, i zapobiegać temu, a więc generować oszczędności. Oszczędności oznaczają niższe koszty produkcji, więc zwiększa się automatycznie konkurencyjność i rentowość



Porównanie mocy skutecznej zużywanej przez ekstruder przed i po wprowadzeniu systemu mierzącego efektywność energetyczną i optymalizacją. Firma Forumplast Folienfabrik GmbH



Pomiar prądu upływu silnika trójfazowego

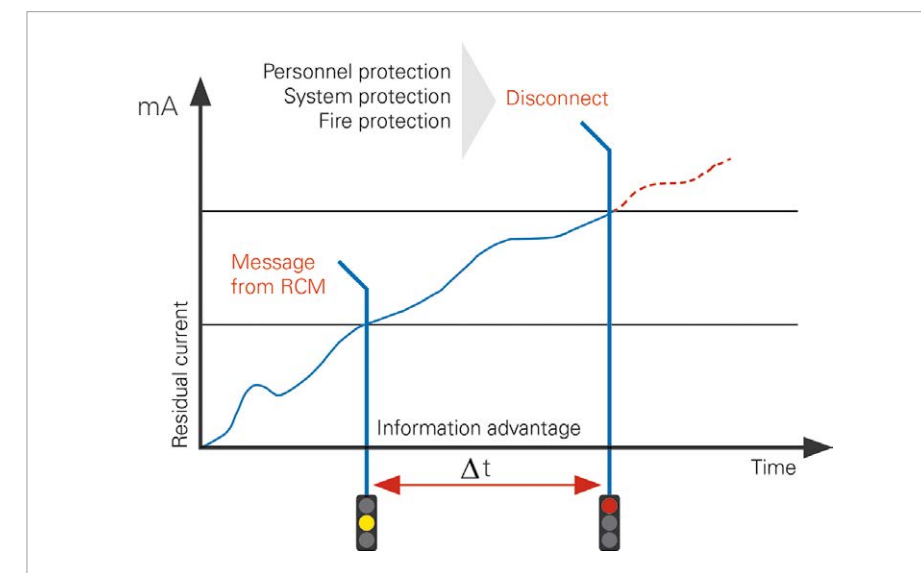
ność przedsiębiorstwa optymalizującego zużycie energii. Inną zaletą takiego systemu jest łatwiejsze kontrolowanie kosztów zakładu, dzięki stałemu monitorowaniu energii. Efektem ubocznym takiego systemu jest możliwość znacznie szybszego zareagowania w przypadku, gdy na produkcji wydarzy się coś niespodziewanego lub zmienia się w ciągu eksploatacji. Przykładowo, stały niewielki wzrost poboru energii silnika elektrycznego może oznaczać jego zużycie lub zwiększające się obciążenie, co daje pewną informację że „coś się dzieje”, więc należy to sprawdzić. Innym przykładem jest np. stały pomiar prądu upływu, może on sygnalizować, jaki jest stan izolacji przewodów, i uprzedzić, że niebawem zadziała wyłącznik różnicowoprądowy, co może wstrzymać produkcję. W wielu przypadkach taka prewencja pozwoli uniknąć nieplanowanych przestojów, które potrafią generować poważniejsze straty.

Z tych kilku przykładów wylania się ciekawy i dosyć oczywisty fakt, że efektywność energetyczna całkowita procesu/instalacji jest sumą częściowych efektywności energetycznych poszczególnych urządzeń i części. Zawsze należy więc

przyjrzeć się każdemu poszczególnemu elementowi procesu i próbować podnieść jego efektywność. Ciekawą metodologią do usprawniania procesów jest filozofia Kaizen. Polega ona na ciągłym nieprzerwanym ulepszaniu, ale małymi krokami. Wydaje się ona idealną filozofią działania w przypadku ciągłego polepszania efektywności energetycznej przedsiębiorstwa.

Dlaczego trzeba dążyć do zwiększania efektywności energetycznej?

Jeśli chodzi o interes przedsiębiorstw, to głównym i racjonalnym powodem do zwiększenia skuteczności produkcji jest oszczędność na kosztach energii, co pozwala zwiększyć zysk. Jeśli chodzi o interes publiczny – głównym powodem, dla którego w każdej branży dąży się do redukcji zużycia energii, jest chęć zmniejszenia emisji CO₂. Zmniejszenie zużycia energii procesów, zakładów, urządzeń itp. ma jeszcze jedną zaletę: sprawia, że zwiększa się krajowe bezpieczeństwo dostaw energii przez mniejsze jej zużycie. W Polsce jest to dosyć poważny problem ostatnimi laty.



Wykres prezentujący, jak z biegiem czasu może rosnąć prąd upływu. Jego stały pomiar pozwala uprzedzić zadziałanie wyłącznika RCD

POBIERZ BEZPŁATNE PORADNIKI

KABLE I PRZEWODY



OCHRONA ODGROMOWA I PRZECIWPRIEPICIOWA



OCHRONA PRZECIWPOŻAROWA



Pobierz:

WWW.ELEKTRO.INFO.PL

Obniżenie rachunków za energię elektryczną poprzez analizę parametrów sieci analizatorem jakości zasilania Sonel PQM

W dobie obecnego kryzysu energetycznego i kurczących się zasobów paliw kopalnych, coraz częściej konsumenci energii elektrycznej szukają sposobów na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej oraz obniżenia opłat.

Proste sposoby na zmniejszenie zużycia energii

Podstawowymi działaniami mającymi na celu zmniejszenie poboru energii elektrycznej są działania optymalizacyjne, takie jak wyłączenie nieużywanych odbiorników, używanie odbiorników w znamionowych warunkach pracy (tzn. bez niedociążenia lub przeciążenia), stosowanie automatyki dbającej o racjonalne wykorzystanie urządzeń elektrycznych (np. automaty zmierzchowe do oświetlenia). Kolejnym krokiem jest instalacja lub wymiana istniejących odbiorników na bardziej energooszczędne, co w naturalny sposób prowadzi do zmniejszenia zużycia energii. dopełnieniem całości jest instalacja lokalnych źródeł zasilania, takich jak instalacje fotowoltaiczne – najlepiej, gdy źródła te są skojarzone z magazynami energii elektrycznej.

Należy jednak zdawać sobie sprawę z tego, że oszczędności to nie tylko zmniejszenie poboru energii czynnej, ale także optymalizacja systemu elektrycznego pod kątem lepszej jakości zasilania. Coraz więcej odbiorców płaci za energię bierną, zarówno o charakterze indukcyjnym jak i pojemnościowym, co jest skutkiem stosowania nowoczesnych odbiorników nieliniowych oraz złej jakości zasilania. Dlatego tak ważne jest w dzisiejszych czasach, aby już na etapie zakupu i instalacji energooszczędnych odbiorników elektrycznych być świadomym, jakie dodatkowe opłaty mogą one spowodować.

Analizatory Sonel a ograniczenie kosztów energii

W jaki sposób można zmniejszyć zużycie energii oraz rachunki za energię elektryczną przy pomocy analizatorów Sonel PQM-700, Sonel PQM-707, Sonel PQM-710 lub Sonel PQM-711? Otóż wystarczy podłączyć analizator w miejscu, które należy zbadać – i wykonać pomiary. Analiza pomiarów pokaże obraz sieci elektrycznej



pod kątem obciążeń, harmonicznych, asymetrii zasilania i innych parametrów, które mogą być poprawione. A możliwości oszczędności energii i kosztów jest kilka.

Odbiorcy energii powszechnie instalują energooszczędne odbiorniki, które mają zużywać mniejsze ilości energii czynnej. Jest to proekologiczne podejście, ale może wiązać się z tym pewna pułapka. Przykładem może być oświetlenie LED. Są to wybitnie energooszczędne źródła światła, ale jednocześnie w przytłaczającej większości są to źródła mocy biernej pojemnościowej. Wiele razy można było usłyszeć o odbiorcach energii elektrycznej, którzy wymienili setki starszych źródeł światła na nowoczesne diodowe, i wymiana zauważalnie zmniejszyła rachunki za energię czynną, ale jednocześnie zwiększyła opłaty za energię bierną pojemnościową. A to może sporo kosztować, gdyż dostawcy energii obciążają odbiorców za każdą kilowatogodzinę, którą zarejestruje licznik zliczający 4-kwadrantowo. Aby obniżyć opłaty za moc bierną, należy stosować mieszanie

odbiorników o charakterze indukcyjnym i pojemnościowym w poszczególnych fazach. Jeśli nie jest to możliwe, pozostaje zainstalowanie kompensatora mocy biernej – czy to w postaci kompensacji statycznej (dławiki, kondensato-



Rys. 1. Wykresy energii biernej indukcyjnej (kolor zielony) oraz pojemnościowej (kolor czerwony)

ry), czy też dynamicznej (kompensatory energoelektryczne). Na **rysunku 1.** przedstawiono przykład rejestracji energii biernej indukcyjnej i pojemnościowej przed i po kompensacji. Przed kompensacją opłaty za energię bierną pojemnościową stanowiły 10% kosztów całości opłat. Dzięki zastosowaniu układu kompensacji, opłaty za moc bierną pojemnościową zmalały o 100% w skali miesiąca.

Proste sposoby na zmniejszenie zużycia energii

Podstawowymi działaniami mającymi na celu zmniejszenie poboru energii elektrycznej są działania optymalizacyjne, takie jak wyłączenie nieużywanych odbiorników, używanie odbiorników w znamionowych warunkach pracy (tzn. bez niedociążenia lub przeciążenia), stosowanie automatyki dbającej o racjonalne wykorzystanie urządzeń elektrycznych (np. automaty zmierzchowe do oświetlenia). Kolejnym krokiem jest instalacja lub wymiana istniejących odbiorników na bardziej energooszczędne, co w naturalny sposób prowadzi do zmniejszenia zużycia energii. dopełnieniem całości jest instalacja lokalnych źródeł zasilania, takich jak instalacje fotowoltaiczne – najlepiej, gdy źródła te są skojarzone z magazynami energii elektrycznej.

Należy jednak zdawać sobie sprawę z tego, że oszczędności to nie tylko zmniejszenie poboru energii czynnej, ale także optymalizacja systemu elektrycznego pod kątem lepszej jakości zasilania. Coraz więcej odbiorców płaci za energię bierną, zarówno o charakterze indukcyjnym jak i pojemnościowym, co jest skutkiem stosowania nowoczesnych odbiorników nieliniowych oraz złej jakości zasilania. Dlatego tak ważne jest w dzisiejszych czasach, aby już na etapie zakupu i instalacji energooszczędnych odbiorników elektrycznych być świadomym, jakie dodatkowe opłaty mogą one spowodować.

Analizatory Sonel a ograniczenie kosztów energii

W jaki sposób można zmniejszyć zużycie energii oraz rachunki za energię elektryczną przy pomocy analizatorów Sonel PQM-700, Sonel PQM-707, Sonel PQM-710 lub Sonel PQM-711? Otóż wystarczy podłączyć analizator w miejscu, które należy zbadać – i wykonać pomiary. Analiza pomiarów pokaże obraz sieci elektrycznej pod kątem obciążeń, harmonicznych, asymetrii zasilania i innych parametrów, które mogą być poprawione. A możliwości oszczędności energii i kosztów jest kilka.

Odbiorcy energii powszechnie instalują energooszczędne odbiorniki, które mają zużywać mniejsze ilości energii czynnej. Jest to proekologiczne podejście, ale może wiązać się z tym pewna pułapka. Przykładem może być oświetlenie LED. Są to wybitnie energooszczędne źródła światła, ale jednocześnie w przytłaczającej większości są to źródła mocy biernej pojemnościowej. Wiele razy można było usłyszeć o odbiorcach energii elektrycznej, którzy wymienili setki starszych źródeł światła na nowoczesne diodowe, i wymiana zauważalnie zmniejszyła rachunki za energię czynną, ale jednocześnie zwiększyła opłaty za energię bierną pojemnościową. A to może sporo kosztować, gdyż dostawcy energii obciążają odbiorców za każdą kilowatogodzinę, którą zarejestruje licznik zliczający 4-kwadrantowo. Aby obniżyć opłaty za moc bierną, należy stosować mieszanie odbiorników o charakterze indukcyjnym i pojemnościowym w poszczególnych fazach. Jeśli nie jest to możliwe, pozostaje zainstalowanie kompensatora mocy biernej – czy to w postaci kompensacji statycznej (dławiki, kondensatory), czy też dynamicznej (kompensatory energoelektryczne). Na **rysunku 1.** przedstawiono przykład rejestracji energii biernej indukcyjnej i pojemnościowej przed i po kompensacji. Przed kompensacją opłaty za energię bierną pojemnościową stanowiły 10% kosztów całości opłat. Dzięki zastosowaniu układu kompensacji, opłaty za moc bierną pojemnościową zmalały o 100% w skali miesiąca.

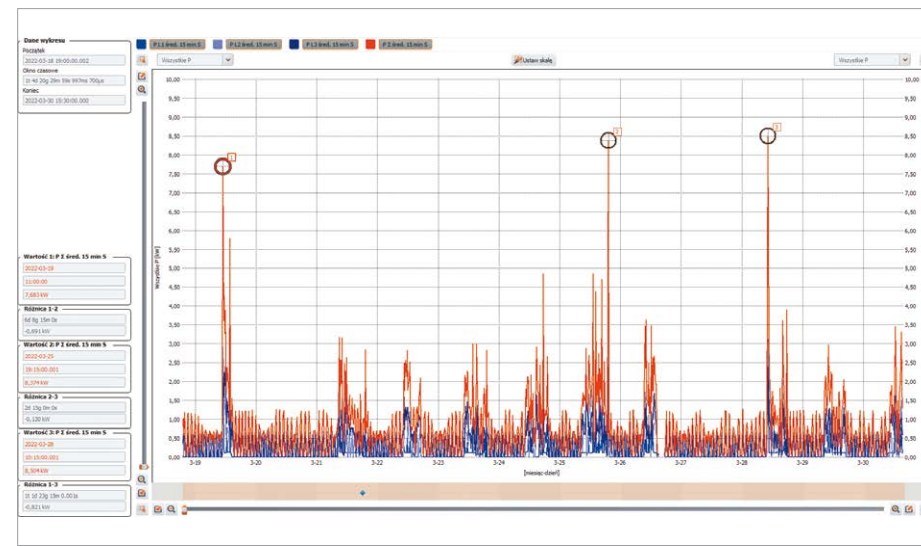
Moc umowna – jak uniknąć kar za jej przekroczenie?

Najistotniejszymi parametrami z punktu widzenia opłat są: moc i energia. Każdy odbiorca ma podpisaną umowę z dostawcą energii elek-

trycznej, w której określona jest moc umowna. Moc umowna określa maksymalną moc czynną, której odbiorca nie może przekroczyć w 15-minutowych okresach rozliczeniowych. Jeśli więc na fakturze występują kary w formie opłat za przekroczenie mocy umownej, tworząc profil obciążenia odbiorcy przy pomocy analizatora Sonel PQM, można szybko wykryć momenty przekroczenia mocy umownej. Instalując energooszczędne odbiorniki oraz optymalizując wykorzystanie odbiorników energii, można doprowadzić do wyeliminowania kar za przekroczenia. Jeśli optymalizacja jest niemożliwa, np. z powodu procesów technologicznych, można wystąpić do dostawcy o zwiększenie mocy umownej. Wiąże się to ze zwiększeniem opłat stałych, ale jeśli analiza wykaze mniejsze koszty opłat z tytułu kar za przekroczenia, oszczędności mogą być istotne. Odwrotna sytuacja może wystąpić, gdy moc umowna jest duża, a realne wykorzystanie mocy przez odbiorcę jest niewspółmiernie małe – wówczas poprzez zmniejszenie mocy umownej można zredukować koszty. Na **rysunku 2.** pokazano profil obciążenia firmy, która miała moc umowną 25,8 kW. Maksymalne użycie mocy zanotowano na poziomie 8,5 kW. Pomiary umożliwiły zmniejszenie mocy umownej, co pozwoliło zmniejszyć opłaty o 6% w skali roku.

Dobór optymalnej taryfy energetycznej

Oszczędności w opłatach za energię czynną można uzyskać poprzez odpowiedni dobór taryfy energii elektrycznej. Ponownie: mając zarejestrowane dane, można skalkulować, która taryfa będzie najbardziej ekonomiczna. Dla wielu odbiorców najczęściej wystarcza najprostsza tary-



Rys. 2. Profil obciążenia małego przedsiębiorstwa

Report kalkulatora kosztów energii

PODSUMOWANIE KALKULACJI				
Wzrost	Jednostka	Taryfa C11	Taryfa C12	Taryfa C13
Energia szczytowa poranna	[kWh]	---	491,90	491,90
Koszt szczytowa poranna	[PLN]	---	584,87	585,72
Energia szczytowa wieczorna	[kWh]	---	1 070,87	939,59
Koszt szczytowa wieczorna	[PLN]	---	1 273,28	1 200,78
Energia pozaszczytowa	[kWh]	---	2 804,36	3 036,36
Koszt pozaszczytowy	[PLN]	---	1 844,26	1 918,55
Energia całkowita	[kWh]	4 467,12	4 467,12	4 467,12
Koszt całkowity	[PLN]	4 248,23	3 702,39	3 683,03

WYKRES KOSZTÓW - TARYFA C11				
5,000				
4,500				
4,000				
3,500				

Rys. 3. Podsumowanie raportu kalkulatora taryf energii elektrycznej czynnej

fa całodobowa, z kolei u innych odbiorców może być zasadna taryfa wielostrefowa – jeśli ich profil obciążenia preferuje zużycie energii w okresach pozaszczytowych, kiedy opłaty są wyraźnie mniejsze. Nie jest niczym nadzwyczajnym uzyskanie oszczędności rzędu kilku procent w skali roku tylko poprzez zmianę taryfy na bardziej optymalną. Warto podkreślić, że oprogramowanie Sonel Analiza, dołączone do analizatorów Sonel PQM, posiada funkcję kalkulatora taryf energii czynnej, która pozwala szybko oszaco-

wać najkorzystniejszą taryfę. Analogicznie do zmiany taryfy korzystna może być zmiana dostawcy energii. Niewielkim nakładem pracy może to zaowocować kolejnym obniżeniem rachunków. Na **rysunku 3**, pokazano podsumowanie raportu

Problemy z jakością zasilania w instalacjach PV

Na wstępie artykułu wspomniano o trendzie instalowania lokalnych źródeł zasilania, w szczególności instalacji fotowoltaicznych. Jest to bar-

dzo dobra inicjatywa mająca na celu zmniejszenie opłat za energię elektryczną. Niestety, duże nagromadzenie mikroinstalacji PV powoduje często poważne problemy z jakością zasilania. Głównie są to przekroczenia dopuszczalnego przepisami limitu napięcia oraz przekroczenia wskaźnika migotania światła. Przyczyn jest kilka: od złej konfiguracji inwerterów, po przestarzałą sieć energetyczną. Największym problemem z punktu widzenia właściciela instalacji PV jest wyłączenie się inwertera i brak generacji mocy czynnej. Powoduje to wymierne straty finansowe. Wykorzystując analizatory serii Sonel PQM, można ustalić przyczyny problemów występujących w sieci. W tym celu właśnie w programie Sonel Analiza można sporządzić specjalny raport poświęcony instalacjom OZE. Mając pomiary, można określić, czy zmieniając ustawienia inwerterów pod kątem zarządzania energią bierną, można zredukować liczbę zbędnych przestojów generatorów. Również dostawca energii na podstawie pomiarów może dokonać niezbędnych przełączeń w sieci lub wręcz zaplanować modernizację linii zasilającej. Na **rysunku 4**, pokazano przykład przekroczenia napięcia w stacji zasilającej dzielnicę willową w dużym mieście. Po analizie pomiarów i możliwości technicznych dokonano przełączenia części odbiorców z instalacjami PV do innej stacji transformatorowej. Spowodowało to poprawę sytuacji, co potwierdzają pomiary analizatorem.

Więcej sposobów na oszczędzanie energii

W dobie wzrostu cen mediów każda oszczędność jest bardzo pożądana. Chcesz podjąć odpowiednie działania optymalizujące koszty energii elektrycznej? Przykłady zastosowań produktów Sonel w obszarze poprawy efektywności energetycznej znajdziesz na stronie: **Efektywność energetyczna – oszczędzaj energię!**



SONEL S.A.
58-100 Świdnica, ul. Wokulskiego 11
tel. 74 884 10 53
bok@sonel.pl
www.sonel.pl



OCHRONA PRZECIWPORAŻENIOWA W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH I INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH NISKIEGO NAPIĘCIA ORAZ OCENA STANU TECHNICZNEGO

2023, wydanie pierwsze
Liczba stron: 388

Wyróżnienie w konkursie TECHNICUS 2024 na najlepszy poradnik techniczny



Naczelna Organizacja Techniczna
Federacja Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych

NOWOŚĆ!



W książce zostały opisane podstawowe zasady projektowania ochrony przeciwporażeniowej w sieciach elektroenergetycznych oraz instalacjach elektrycznych niskiego napięcia z uwzględnieniem specyfiki dostępnych źródeł zasilania. Omówiono także zasady badania stanu technicznego instalacji elektrycznych niskiego napięcia. W celu ułatwienia korzystania z publikacji na końcu zasadniczej części książki zostały zamieszczone załączniki, w których podano wymagania dotyczące ochrony urządzeń elektrycznych przez obudowy, parametry zwarciove transformatorów, linii napowietrznych i kablowych oraz tabele pomocnicze do oceny skuteczności samoczynnego wyłączenia zasilania podczas zwarc. Wiedzę w niej zawartą z pewnością docenią projektanci, inspektorzy nadzoru, ochrony przeciwpożarowej oraz osoby wykonujące badania stanu technicznego instalacji elektrycznych niskiego napięcia.

ZOBACZ WIĘCEJ:



Zamów:

ksiegarniatechniczna.com.pl

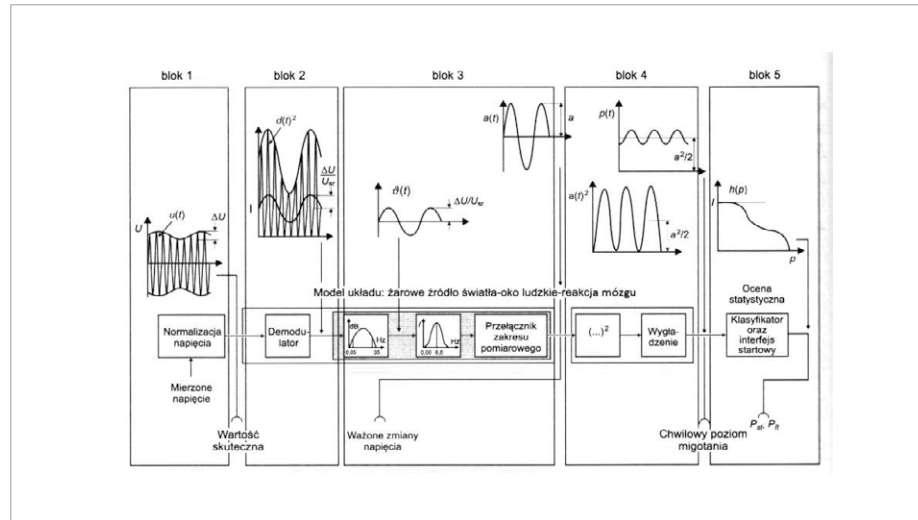
Rys. 4. Wykresy napięć w stacji zasilającej

Kompensacja mocy biernej dla odbiorców o szybkich i częstych zmianach jej zapotrzebowania

Wartość skuteczna napięcia jako miara jakości energii

Wartość skuteczna napięcia zasilającego w sieciach rozdzielczych i instalacjach elektroenergetycznych jest jednym z najważniejszych parametrów określających jakość zasilania. Wartość napięcia musi spełnić określone wymagania jakościowe zawarte między innymi w rozporządzeniu [1], które określa dopuszczalne odchylenia w stosunku do wartości znamionowej. Dla sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia wymagane jest, aby w każdym tygodniu 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego mieściło się w przedziale odchyżeń $\pm 10\%$ napięcia znamionowego. Rozporządzenie to bazuje na zapisach normy [2], która określa większą liczbę parametrów jakościowych napięcia. W systemie elektroenergetycznym możliwa jest regulacja wartości skutecznej napięcia poprzez zmianę zaczepów transformatorów lub zmianę bilansu mocy biernej. Możliwa jest regulacja, w sieciach niskiego napięcia, poprzez włączenie dodatkowych urządzeń regulujących [3].

Praca odbiorników energii elektrycznej jest silnie uzależniona od rzeczywistej wartości sku-



Rys. 1. Schemat blokowy miernika migotania światła UIE. Na rysunku przedstawiono przebiegi sygnałów w wybranych punktach miernika, stosując odpowiedź na zmodulowany sinusoidalnie sygnał wejściowy [5]

tecznej napięcia. Moment silników asynchronicznych jest uzależniony od kwadratu wartości napięcia. Wartość strumienia światła zależy od rodzaju lampy i od wartości napięcia. Praca odbiorników elektronicznych bądź energoelektronicznych przy niewłaściwym poziomie napięcia w ogóle może być niemożliwa. Nie tylko wartość napięcia, ale również ciągłość zasilania jest ważna. Wynika stąd stosowanie, w szczególności

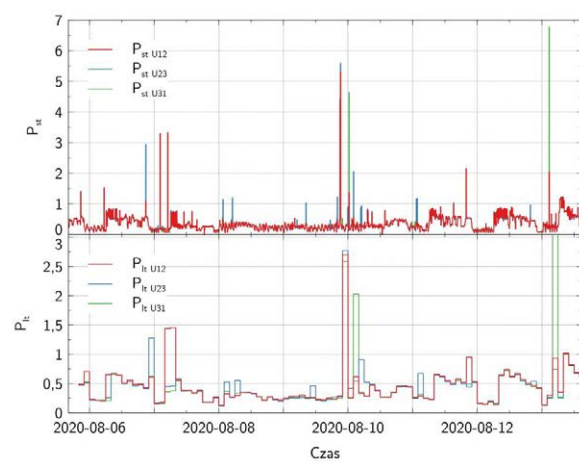
wymagających przypadkach, szeregu różnych rozwiązań zasilania rezerwowego i bezprzewodowego. Rozwiązania te obejmują zasilanie rezerwowe z sieci publicznej, generatory spalinowe czy różne układy zasilania bezprzewodowego typu UPS [4], mogące również współpracować z odnawialnymi źródłami energii.

Istotnym aspektem pracy odbiorników są szybkie zmiany napięcia w obwodzie zasilającym. Zmiany te mogą być spowodowane niestabilną pracą odbiorników. Zmiana poboru prądu będzie prowadziła do zmian spadków napięcia w torze prądowym, co w sposób bezpośredni będzie przekładało się na wartość napięcia za-

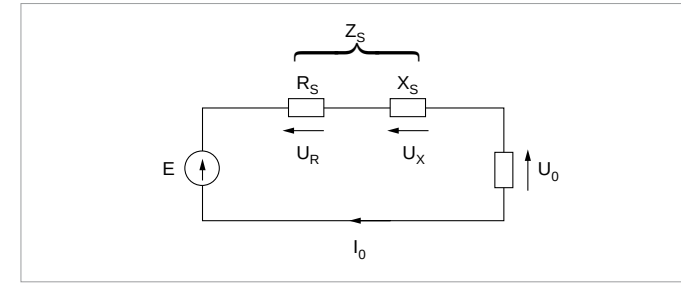
STRESZCZENIE

Nowoczesne procesy produkcyjne w zakładach przemysłowych generują zwiększone zapotrzebowanie na moc bierną. Dynamiczna praca odbiorników elektrycznych, częste ich załączanie bądź przełączanie trybu pracy generuje znaczne i krótkotrwałe zmiany poboru mocy biernej. W takim środowisku nie można stosować tradycyjnych układów kompensacyjnych, a preferowanym rozwiązaniem stają się statyczne kompensatory mocy biernej.

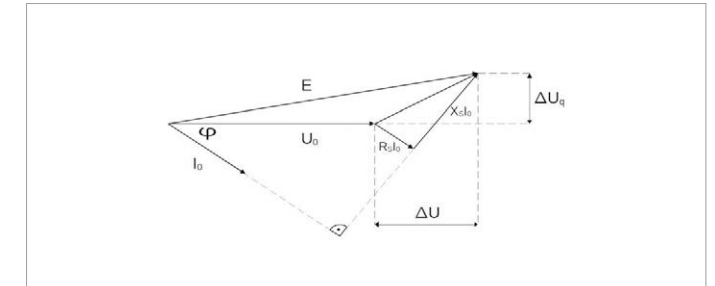
Słowa kluczowe: kompensacja mocy, SVG, STATCOM, odbiorniki nieliniowe.



Rys. 2. Zmienność wartości współczynników krótko- i długookresowego migotania światła dla wybranego zakładu przemysłowego rys. A. Książkiewicz



Rys. 3. Uproszczony schemat elektryczny do wyznaczania wartości spadku straty napięcia rys. A. Książkiewicz



Rys. 4. Wykres wektorowy napięć dla schematu z rysunku 3. rys. A. Książkiewicz

silającego odbiorniki w rozpatrywanym obwodzie. Miara tych zmian są wskaźniki migotania światła krótkookresowego P_{st} i długookresowego P_{lt} . Sam proces wyznaczania tych wskaźników jest dość skomplikowany i został szeroko opisany w literaturze fachowej [2, 5, 6]. Schemat blokowy miernika migotania światła przedstawiono na **rysunku 1**.

Wartość krótkookresowego migotania światła wyznacza się zgodnie ze wzorem [5, 7]:

$$P_{st} = \sqrt{k_{0,1}P_{0,1} + k_{1,1}P_{1,1} + k_{3,1}P_{3,1} + k_{10,1}P_{10,1} + k_{50,1}P_{50,1}} \quad (1)$$

gdzie współczynniki $k_{0,1}$ do $k_{50,1}$ to współczynniki ważenia i ich wartość wynika z przyjętych procedur obliczeniowych, a $p_{0,1}$ do $p_{50,1}$ to poziomy migotania światła, dla których określone jest prawdopodobieństwo ich nieprzekroczenia. Aby uzyskać zwiększoną odporność współczynnika P_{st} na skokowe zmiany wartości, wprowadzono dodatkowe punkty pomiarowe:

$$\begin{aligned} P_{50} &= P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80}) / 3, \\ P_{10} &= P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}) / 5, \\ P_3 &= P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4) / 3, \\ P_{1,5} &= P_{1,5s} = (P_{0,7} + P_{1,5}) / 3, \end{aligned} \quad (2)$$

Przyjmuje się, że wartość współczynnika powyżej jedności związana jest z uciążliwymi wahaniami napięcia. Krótkookresowy wskaźnik migotania światła odpowiedni jest do oceny wahań napięcia dla pojedynczego odbiornika. W celu analizy wpływu wielu odbiorników, we wspólnym punkcie przyłączeniowym lub przy długim cyklu pracy, właściwym będzie zastosowanie długookresowego wskaźnika migotania światła:

$$P_{lt} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N} \right]^{1/3} \quad (3)$$

Przyjęto, że oblicza się jego wartość dla przedziału czasu dwugodzinnego, uwzględniając w nim 12 10-minutowych wartości współczyn-

nika P_{st} . Wartość tego wskaźnika jest o tyle istotna, że została ujęta w normie [2] i rozporządzeniu [1]. Wymagane jest, aby przez 95% czasu każdego tygodnia wskaźnik długookresowego migotania światła P_{lt} spowodowanego wahaniami napięcia zasilającego nie był większy od 1.

Przykładowa zależność pomiędzy wartościami wskaźników P_{st} i P_{lt} przedstawiona została na **rysunku 2**. Można zauważyć, że pojawiają się krótkotrwałe, ale znaczące zmiany współczynnika P_{st} , który osiąga znaczne wartości, różne dla poszczególnych faz napięcia zasilającego. Zmianom tym odpowiadają podwyższone wartości współczynnika P_{lt} .

W celu redukcji migotania światła rozróżnia się tak naprawdę dwa sposoby [5, 7]:

» zwiększenie mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia odbiornika niespokojnego (w stosunku do mocy odbiornika); w praktycznych działaniach oznacza to: (a) przyłączanie odbiornika do szyn o coraz wyższym napięciu znamionowym, (b) wydzielanie specjalnych, dedykowanych linii bezpośrednio z sieci wn do zasilania tej kategorii odbiorników, zasilanie odbiorników spokojnych i niespokojnych z oddzielnych uzwojeń transformatorów trójuzwojeniowych lub oddzielnych transformatorów (separacja odbiornika niespokojnego), (c) zwiększanie mocy transformatora zasilającego odbiornik niespokojny, (d) instalowanie kondensatorów szeregowych itp.

» zmniejszenie zmian mocy biernej w sieci zasilającej poprzez instalację tzw. kompensatorów/stabilizatorów dynamicznych.

Spadek napięcia uzależniony od mocy biernej

Przepływ prądu elektrycznego przez tory prądowe prowadzi do wystąpienia spadku napięcia. Spadek ten jest uzależniony od rzeczywistej wartości skutecznej prądu oraz od wartości rezystancji i reaktancji elementów przesyłowych (**rys. 3**). Należy rozróżnić stratę napięcia (wzór (4)), będącą różnicą geome-

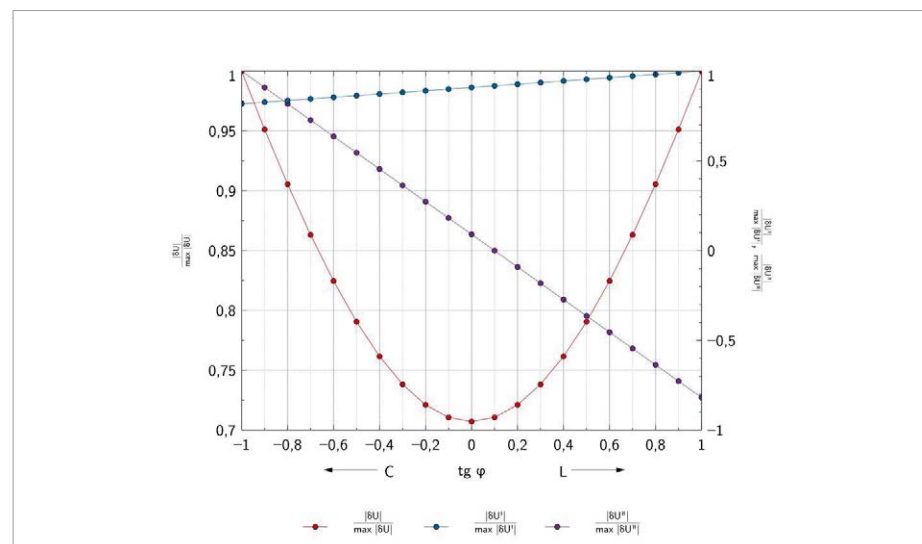
tryczną napięcia na końcu i początku linii, od spadku napięcia (wzór (5)), który określa tylko różnicę arytmetyczną [8, 9]. Zależność ta może być przedstawiona na wykresie wektorowym (**rys. 4**). Różnica geometryczna między wektorami E oraz U_0 jest właśnie stratą napięcia. Strata ta jest uzależniona, zgodnie ze wzorem (4), od przesyłu mocy czynnej i biernej przez elementy rezystancyjne i indukcyjne w torze prądowym. Dla niewielkich wartości kąta między tymi wektorami można przyjąć, że różnica ta jest praktycznie równa spadkowi napięcia, zgodnie ze wzorem (5). Istotny wpływ na możliwość korzystania ze wzoru uproszczonego będą miały wartości R_S oraz X_S toru prądowego. Przy dominującym udziale rezystancji przesunięcie kątowe między wektorami E i U_0 będzie niewielkie. W układach zasilających zakłady przemysłowe, gdzie stosowane są jednostki transformatorowe dużych mocy oraz przewody, kable i szynoprzewody o znacznych przekrojach, dominująca może okazać się wartość reaktancji indukcyjnej X_S .

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_n} + j \frac{PX - QR}{U_n} \quad (4)$$

$$\Delta U \approx \frac{PR + QX}{U_n} \quad (5)$$

Na podstawie powyższych rozważań, wyraźnie widać, że na wartość spadku napięcia istotny wpływ mają takie czynniki jak reaktancja indukcyjna toru prądowego oraz wartość przesyłanej mocy biernej. Na wypadkową wartość spadku napięcia pośrednio ma więc wpływ wartość współczynnika $\tan \varphi$ (**rys. 5**). Najniższa wartość straty napięcia, a tym samym najmniejszy błąd popełniany przy obliczaniu spadku napięcia, jest przy wartości $\tan \varphi$ równej zero. Im bardziej wartość tego współczynnika rośnie, niezależnie, czy w kierunku charakteru indukcyjnego, czy pojemnościowego odbiornika, rośnie wypadkowa strata napięcia.

Zmiana wartości skutecznej napięcia jest silnie powiązana ze zmianami poboru mocy biernej przez odbiornik. Ma to odczuwalne skutki,



Rys. 5. Względna zmiana wartości straty napięcia w funkcji współczynnika $\operatorname{tg} \varphi$, gdzie: $\delta U'$ – część rzeczywista straty napięcia, $\delta U''$ – część urojona straty napięcia rys. A. Książkiewicz

spokojnych, gdzie zmiana poboru mocy zachodzi często i może charakteryzować się wysokimi amplitudami. Przykładowym odbiornikiem tego typu może być piec łukowy. Piece łukowe pracują przy niskiej wartości współczynnika mocy i przy dużych wahaniami napięcia zasilającego [10].

Jak wspomniano wcześniej, w obwodach zasilających może wystąpić sytuacja, gdzie reakcja obwodu będzie miała większą wartość niż rezystancja. Tym samym to zmiany poboru mocy biernej mogą mieć porównywalny, a nawet większy wpływ na wypadkową wartość wahań napięcia niż zmiany mocy czynnej. Z tego powodu jako jeden z możliwych i skutecznych środków zmniejszenia wahań napięcia jest zastosowanie kompensacji mocy biernej. Kompensacja ta musi uwzględniać jednak dodatkowe wymagania, aby mogła być skuteczna. Do wymagań tych należy zaliczyć między in-

nika niespokojnego. Pozwoli to na odciążenie wszystkich elementów obwodu zasilającego dany odbiornik. Kolejnym wymaganiem będzie zastosowanie kompensatora o krótkim czasie reakcji. Możliwy wybór tak naprawdę zawęża się do urządzeń typu STATCOM/SVG, a więc energoelektronicznych generatorów mocy biernej. Pozwalają one na prawie bezzwłoczną, nadążną kompensację mocy biernej.

Stacyjne generatory mocy biernej

Typowe układy kompensujące, oparte na bateriach kondensatorowych lub dławikowych sterowanych klasycznymi stycznikami, a nawet poprzez układy tyrystorowe, nie są w stanie zapewnić właściwych parametrów jakości energii, przy kompensacji mocy biernej w układach zasilających odbiorniki niespokojne, gdzie występują znaczne wahania napięcia. Rozwiązaniem,

jakie można tutaj zaproponować, są statyczne generatory mocy biernej, tzw. SVG (**rys. 6.**). Są to urządzenia energoelektroniczne wykorzystujące do swojego działania układy tranzystorów IGBT (**rys. 7.**), które klucząc wg określonego algorytmu regulacji, załączają kondensator i w ten sposób generują przepływ mocy biernej [11].

Układy kompensacyjne SVG pozwalają na kompensację mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej w jednym urządzeniu, symetryzację obciążeń, praktycznie nieograniczoną liczbę cykli łączeniowych. Urządzenia te zapewniają również uzupełniającą filtrację wyższych harmonicznych prądu do trzynastego rzędu, a dzięki ciągłej kontroli pobieranego prądu nie zachodzą zjawiska rezonansowe.

Kompensatory SVG pozwalają na nadążną kompensację, niezależną dla każdej z faz, co umożliwia ograniczenie zapotrzebowania na moc bierną także w układach, gdzie dynamika zmian obciążenia jest znaczna. Niedostosowanie układu kompensacyjnego, gdzie występuje asymetria obciążenia, może prowadzić do niezadowalających rezultatów w zakresie kompensacji [12].

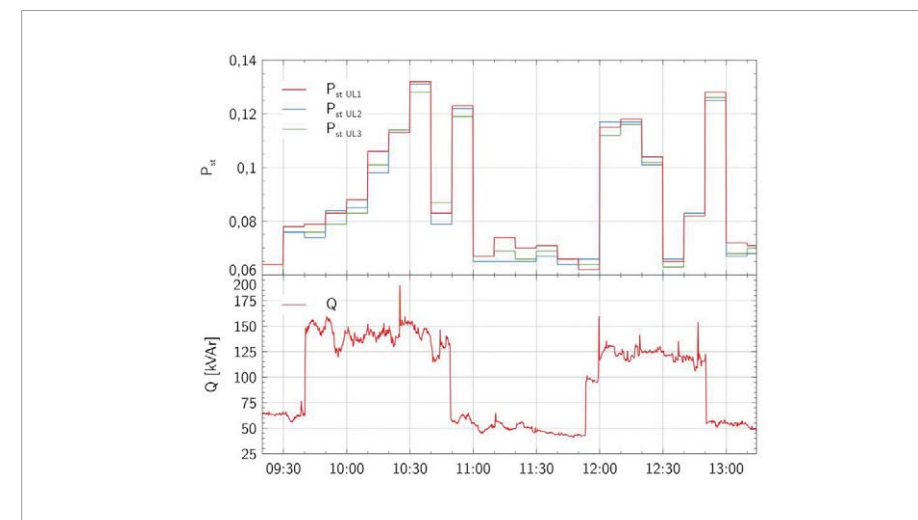
Przy czasie odpowiedzi na zmiany zapotrzebowania nie dłuższym niż 1 ms generowana moc bierna dostarczana jest do odbiornika płynnie, praktycznie bez obciążania układu zasilającego. Dodatkowo urządzenia pozwalają na generację mocy biernej o charakterze pojemnościowym lub indukcyjnym, co ma zastosowanie w zakładach, gdzie np. w porze nocnej lub podczas dni wolnych od pracy, charakter zapotrzebowanej mocy biernej zmienia się z indukcyjnego na pojemnościowy. Zastosowanie energoelektronicznych układów łączących pozwala na prawie nieograniczono-

ną liczbę cykli łączeniowych. Dla porównania styczniki łączeniowe w bateriach kondensatorów pozwalają na ok. 100 przełączeń w ciągu godziny i około 100 tys. do 400 tys. łążeń elektrycznych w cyklu życia produktu (zależnie od modelu i producenta).

Analizie poddano układ, w którym zainstalowany został układ kompensatora w postaci filtra aktywnego wyższych harmonicznych, którego podstawowym zadaniem była kompensacja mocy biernej, a przy wystarczającym zapasie mocy również redukcja wyższych harmonicznych prądu. Na **rysunku 8**, przedstawiono zmienność wartości współczynników migotania krótkookresowego P_{st} dla poszczególnych faz w odniesieniu do zmian zapotrzebowania na moc bierną. Można wyróżnić tutaj dwa przedziały. Kiedy układ kompensatora był aktywny, wartość mocy biernej utrzymywała się na niskim poziomie, natomiast kiedy był wyłączony, wartość mocy biernej rosła.

Zauważalny jest wzrost wartości P_{S1} w przedziałach czasu, których kompensator nie pracował. Wiązało się to ze zwiększonym zapotrzebowaniem układu na moc bierną, a tym samym ze wzrostem spadków napięcia w torze przesyłowym. Zmiany te prowadzą nie tylko do wzrostu wartości wskaźnika migotania krótkookresowego, ale również do zwiększenia się dynamiki jego zmian. Po załączeniu układu kompensującego wyraźnie zaznacza się obniżenie wartości wskaźnika migotania i utrzymywanie się na stosunkowo stabilnym poziomie. Podobna sytuacja przedstawiona jest dla poboru mocy biernej. Po załączeniu układu kompensującego następuje oczywisty spadek poboru mocy biernej, ale równocześnie brak jest widocznych znacznych zmian jej wartości. Niespokojne zmiany widoczne są natomiast przy niepracującym kompensatorze. Tym samym układ kompensatora pozwolił na poprawę parametrów jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia.

W tym miejscu można również podnieść jakość pracy układu SVG w zakresie utrzymywania zadanej wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$. Analizie poddano pracę układu w obwodzie zasilającym budynek biurowy. Na **rysunku 9**, przedstawiono wykres zmienności wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$ w czasie oraz zaznaczono czas załączenia kompensatora SVG. Wyraźne zmiany współczynnika mocy przed załączeniem układu związane są z częstymi zmianami charakteru obciążenia. Przy wartościach poniżej 0,9 następuje tak naprawdę zmiana charakteru obciążenia z indukcyjnego na pojemnościowy. Przy działającym układzie



Rys. 8. Zmiany wartości wskaźnika migotania krótkookresowego P_{st} odniesione do zmian poboru mocy biernej
rys. A. Książkiewicz

kompensacji $\cos \varphi$ zawiera się w granicach od 0,98 do 0,99 o charakterze indukcyjnym. Pojawiają się pojedyncze i krótkotrwałe momenty, gdzie współczynnik mocy nie zmieścił się w wyznaczonych granicach. Następowало to tylko jednak raz w ciągu pojedynczej doby pomiaru.

Dla rozpatrywanego przypadku przedstawiono na **rysunku 10**, wykres zmienności wartości całkowitego współczynnika odkształcenia prądu THD_i oraz wartości mocy czynnej P. Wskazano również moment wyłączenia kompensatora. Można zauważyć, że dla całego analizowanego przedziału czasu moc czynna utrzymuje się od 15 kW do 25 kW, z chwilowymi poborami na poziomie do 30 kW. Podczas pracy kompensatora wartość THD_i utrzymywała się w granicach od 5% do 10%. Po jego wyłączeniu odkształcenia krzywej prądu wzrastają, a wartość THD_i utrzymuje się na poziomie od 15% do 25%.

I Podsumowanie

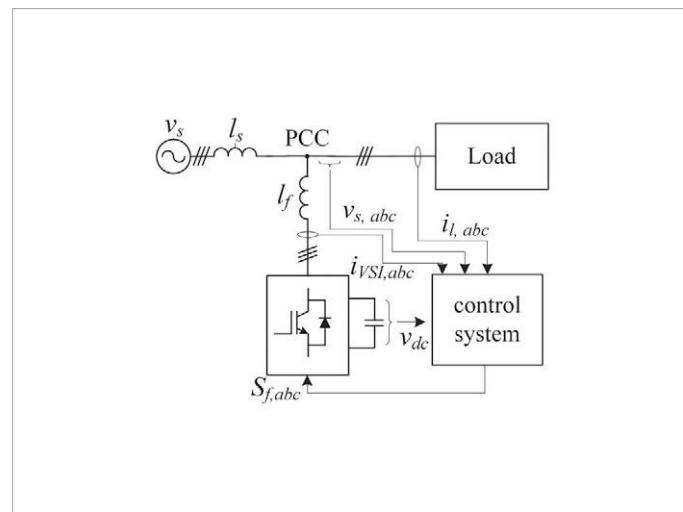
Szybkie zmiany napięcia mogą występować w układach zasilających odbiorniki niespokojne. Zmiany te mogą prowadzić do niewłaściwej pracy innych odbiorników zasilanych z tej samej sieci elektroenergetycznej. Mogą również wpływać negatywnie na psychofizyczne aspekty pracy w sytuacjach, gdzie pojawia się uciążliwe migotanie światła. Samo wyznaczanie wskaźnika krótkookresowego i długookresowego migotania światła nie jest zadaniem prostym. Można natomiast na podstawie tych wskaźników określić natężenie zjawiska wahań napięcia. Jednym ze sposobów redukcji tych wahań jest zastosowanie energoelektronicznych kompensatorów, takich jak urządzenia SVG. Jak wykazano, dzięki nim możliwa jest nie tylko kompensacja mocy biernej w warunkach

quasi-statycznych. Następuje również zmniejszenie dynamiki zmian pobieranej mocy biernej, co będzie przekładać się na mniejsze wahania napięcia, związane ze spadkiem napięcia wywołanym przesyłem mocy biernej przez elementy indukcyjne. W rezultacie powinno nastąpić ograniczenie uciążliwego zjawiska migotania światła, bez konieczności dokonania znacznych i kosztownych zmian w układzie zasilającym.

Przedstawiono również pracę układu zainstalowanego w obiekcie biurowym, gdzie wykazano prawidłową pracę kompensatora w zakresie utrzymywania zadanej wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$. Zaprezentowano jego wpływ na wartość całkowitego współczynnika odkształcenia prądu THDi. Na podstawie wyżej przedstawionych analiz i wyników pomiarów można stwierdzić, że kompensator typu SVG pozwala na równoczesne zaadresowanie kilku problemów w zakresie jakości energii elektrycznej.



Rys. 6. Widok zewnętrzny kompensatora SVG, model ASTec, o mocy 50 kVAr
rys. A. Książkiewicz



Rys. 7. Schemat blokowy statycznego generatora mocy biernej [4]



literatura do artykułu na **elektro.info.pl**

ABSTRACT

Reactive power compensation for loads with fast and frequent changes of its demand

Modern production processes in industrial facilities generate increased demand for reactive power. Dynamic operation of electric loads, their frequent switching of operating mode generates significant and short-term changes in reactive power consumption. In such an environment, traditional compensation systems cannot be used, and static reactive power compensators become the preferred solution.

Keywords: power compensation, SVG, STATCOM, non-linear loads.

Cel stosowania przekładników prądowych oraz sposoby kompensacji mocy biernej

zagadnienia wybrane

Rozwój elektryczności spowodował potrzebę mierzenia wielkości elektrycznych w szczególności napięcia i prądu elektrycznego. Dodatkowo pomiary różnych wielkości elektrycznych, w tym mocy biernej, są stosunkowo łatwe do zrealizowania, szybko i względnie dokładne.

Rozwojowi elektryczności towarzyszyły prace nad pomiarami prądu. Pierwsza definicja ampera, która miała charakter międzynarodowy, pojawiła się w 1893 r. na Międzynarodowym Kongresie Elektrycznym w Chicago. Definicja ta została potwierdzona na międzynarodowej konferencji w Londynie w 1908 r. „Międzynarodowy amper” była to realizacja jednostki miary zdefiniowana jako prąd, który w sekundę wytrąci 1,118 miligrama srebra z roztworu azotanu srebra. Obecnie dokładne pomiary pokazują, że ówczesny 1 „międzynarodowy amper” to dzisiejsze 0,99985 A.

Powyższa definicja miała jednak zasadniczą wadę – silnie wiązała jednostkę z jej praktyczną realizacją, a niestający postęp w wytwarzaniu i pomiarze prądu elektrycznego pokazywał, że istnieją znacznie lepsze metody odtworzenia jednostki ampera. Z tego powodu 9. Generalna Konferencja Miar (CGPM) w 1948 r. zatwierdziła nową definicję ampera, która obowiązywała do

maja 2019 r. Jej oficjalne brzmienie jest następujące: amper – prąd elektryczny niezmienny się, który, płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę 2×10^{-7} niutona na każdy metr długości.

Rozwój metrologii, w tym metrologii elektrycznej, spowodował, że zjawiska kwantowe wykorzystuje się w jednych z najdokładniejszych wzorców jednostek miar – wzorce napięcia elektrycznego i rezystancji. Pierwszy z nich jest oparty na zjawisku kwantowym Josephsona, a drugi – zjawisku kwantowym Halla. Dzięki nim można stacjonarnie (niezależnie od czasu i miejsca) odtwarzać jednostki miar tych wielkości z dużą dokładnością, sięgającą ośmiu, dziewięciu miejsc po przecinku. Współcześnie jednostkę prądu elektrycznego realizujemy poprzez wykorzystanie zależności z prawa Ohma. Wykorzystujemy kwantowy wzorec Josephsona do bardzo dokładnego wytwarzania i pomiaru napięcia elektrycznego oraz kwantowy wzorec Halla do wytwarzania wzorcowej rezystancji. W obu wzorcach zjawiska fizyczne są scharakteryzowane stałymi fizycznymi, odpowiednio stałą Josephsona i stałą von Klitzinga. Obie stałe wyrażone są w odniesieniu do stałych podstawowych, takich jak ładunek elementarny (e) oraz stała Plancka (h) [1].

Od 20 maja 2019 r. definicja ampera uzyskała następujące oficjalne brzmienie: amper – jest to jednostka prądu elektrycznego w układzie SI zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej war-

tości liczbowej ładunku elementarnego e, wynoszącej $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, wyrażonej w Kulombach C ($C = As$), gdzie sekunda zdefiniowana jest za pomocą $\Delta\nu_{Cs}$. Nowa definicja ampera opisuje dokładną relację $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} A \cdot s$. Przekształcenie tego równania daje wyrażenie na określenie ampera w odniesieniu do stałych definiujących e i $\Delta\nu_{Cs}$ [1]:

$$1A = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) s^{-1}$$

co jest równe:

$$= \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{Cs} e \approx 6,789\,687 \times 10^{-8} \Delta\nu_{Cs} e$$

Wynika stąd, że jeden amper jest prądem elektrycznym odpowiadającym przepływowi $1/(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})$ ładunków elementarnych na sekundę.

Dotychczasowa definicja ampera, która w swojej formie (poprzez niutona – $N = kg \cdot m \cdot s^{-2}$) odnosiła się do jednostki masy (kilograma) wciąż zdefiniowanej, jako niestabilny wzorec materialny (tzw. kilogram z Sèvres) została zastąpiona stałymi definiującymi e i $\Delta\nu_{Cs}$.

Nowe brzmienie definicji zostało ostatecznie sformułowane i zatwierdzone podczas XXVI Generalnej Konferencji Miar, która odbyła się w dniach 13–16 listopada 2018 r. [1].

I Pomiar prądu i energii

Oprócz pomiaru energii liczniki energii umożliwiają pomiary szeregu innych wielkości, np. mocy, prądu, napięcia i częstotliwości. W zależ-

ności od napięć i mierzonych prądów liczniki mogą mierzyć prąd i napięcie w sposób bezpośredni lub pośredni poprzez przekładniki.

Niestety Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 19 kwietnia 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać przekładniki klasy dokładności 0,5 i dokładniejsze do współpracy z licznikami energii elektrycznej czynnej prądu przemiennego oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (DzU z 2007r. nr 92, poz. 618) zostało uchylone bez zastąpienia Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 4 stycznia 2008 r. (DzU z 2008 r. nr 8 poz. 48).

Wprowadzone zostało natomiast Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 7 stycznia 2008 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać liczniki energii elektrycznej czynnej prądu przemiennego oraz szczegółowego zakresu sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (DzU z 2008r. nr 11 poz. 63), które tylko laconicznie mówi o zastosowaniu przekładników.

Na dokładność półpośredniego i/lub pośredniego układu pomiarowo-rozliczeniowego największy wpływ ma licznik, jednak nie można pominąć wpływu wartości błędów wnoszonych przez zainstalowane w układzie przekładniki. Dlatego przy ocenie dokładności wskazań układu pomiarowo-rozliczeniowego należy uwzględnić błędy wnoszone przez przekładniki prądowe i napięciowe oraz przez liczniki. W tym miejscu należy zadać pytanie – czy brak przepisów pozostawia odwołanie się do opublikowanych w Dzienniku Urzędowym Miar i Probiernictwa Nr 43 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 27 grudnia 1994 r. w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych o przekładnikach prądowych i napięciowych klasy dokładności 0,5 i dokładniejszych oraz Nr 44 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 27 grudnia 1994 r. w sprawie wprowadzenia instrukcji sprawdzania przekładników prądowych i napięciowych klasy dokładności 0,5 i dokładniejszych?

Natomiast kryteria doboru przekładników prądowych opisano w literaturze [2, 3]. Na szczególną uwagę zasługuje książka profesora Nowicza [3], w której opisał drobiazgowo konstrukcje klasyczną, specjalną i niekonwencjonalną przekładników stosowanych w układach kontrolno-pomiarowych.

I Kompensacja mocy biernej

Większość odbiorników energii elektrycznej pobiera z sieci elektroenergetycznej ener-

gię czynną i bierną. Energia czynna zamieniana jest na pracę użyteczną oraz najczęściej na straty cieplne. Energia bierna natomiast warunkuje działanie wielu odbiorników energii elektrycznej choć nie wykonuje pracy [4].

Problematyka kompensacji mocy biernej pojawiła się już na początku ubiegłego stulecia, kiedy w praktyce przemysłowej zaczęto na dużą skalę wykorzystywać energię elektryczną. Okazało się, że przy poborze energii czynnej potrzebnej do pracy urządzeń, niejako równolegle pobierana jest też energia bierna, która jest efektem przepływu prądu przez elementy indukcyjne [5].

Odbiorniki energii elektrycznej zasilane napięciem sinusoidalnym z reguły nie stanowią czystej rezystancji – mogą mieć charakter indukcyjny lub pojemnościowy. Wynika stąd, że jeżeli prąd nie jest w fazie z napięciem, lecz wyprzedza go to mamy przypadek obciążenia pojemnościowego (**rys. 1a**). Natomiast gdy następuje opóźnienie prądu względem napięcia to obciążenie ma charakter indukcyjny (**rys. 1b**) [6, 7].

Większość odbiorników energii elektrycznej posiada charakter indukcyjny, przykładami mogą być: silniki asynchroniczne, transformatory, linie przesyłowe, instalacje oświetleniowe z lampami jarzeniowymi, piece indukcyjne itp.

I Współczynnik mocy

Miarą składowej biernej prądu jest współczynnik mocy $\cos\varphi$, często wyrażany również jako $\text{tg}\varphi$, podawany w warunkach technicznych przyłączenia do sieci elektroenergetycznej, taryfie za energię elektryczną i innych dokumentach. Podaną wartość współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ można przeliczyć na wartość $\cos\varphi$, korzystając ze wzoru:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{\text{tg}^2\varphi + 1}}$$

Praca odbiorników przy małej wartości współczynnika mocy $\cos\varphi$ powoduje zwiększony pobór prądów roboczych w stosunku do pracy przy tej samej mocy czynnej i współczynnika mocy bliskim jedności [4, 7].

Niski współczynnik mocy powoduje szereg skutków ujemnych [4, 7]:

- » konieczność instalowania urządzeń wytwórczych i przetwórczych o większych mocach znamionowych,
- » konieczność stosowania aparatów o większych prądach znamionowych oraz większych dopuszczalnych prądach zwarciovych,

- » konieczność stosowania przewodów o większych przekrojach,
- » zmniejsza przepustowość sieci zasilających,
- » zwiększa straty energii czynnej w transformatorach, sieciach oraz instalacjach odbiorczych,
- » zwiększa spadki napięć w transformatorach i liniach zasilających.

Współczynnik mocy ($\cos\varphi$) odbiorników o charakterze indukcyjnym jest najczęściej mniejszy od jedności. Przykładowo dla silników asynchronicznych zmienia się od około 0,1 podczas biegu jałowego do około 0,9 podczas obciążenia nominalnego. W praktyce dąży się do całkowitej lub częściowej poprawy tego współczynnika [6].

Częściowa poprawa współczynnika mocy polega na zwiększeniu jego wartości do 0,93. Całkowita poprawa współczynnika mocy polega na zwiększeniu jego wartości do 1. Najczęściej stosowanym urządzeniem kompensacyjnym jest bateria kondensatorów, którą łączy się z odbiornikami energii równolegle (**rys. 2**).

Pojemność kondensatora potrzebnego do całkowitej kompensacji mocy biernej oblicza się ze wzoru [6, 7]:

$$C = \frac{P \text{tg}\varphi}{U^2 \omega}$$

gdzie:

P – moc czynna odbiornika,
 φ – kąt fazowy impedancji odbiornika,
 U – napięcie zasilania,
 ω – pulsacja.

W przypadku kompensacji częściowej powyższa zależność przyjmuje postać:

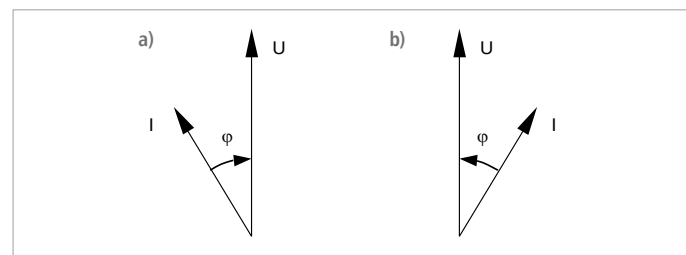
$$C = \frac{P(\text{tg}\varphi - \text{tg}\varphi')}{U^2 \omega}$$

gdzie:

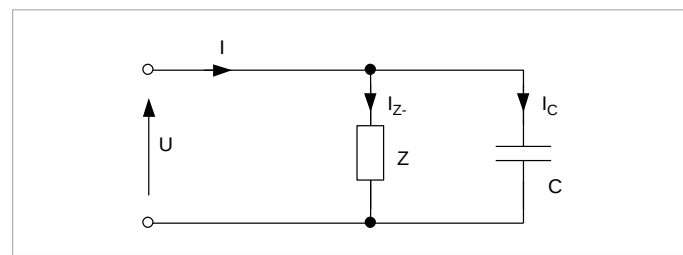
φ' – kąt fazowy po kompensacji.
 Wykresy wskazowe napięć i prądów dla różnych przypadków kompensacji pokazano na **rysunku 3**.

W przypadku przekompensowania odbiornika, w tym przypadku równoległe połączenie baterii kondensatorów i właściwego odbiornika energii zmienia charakter z indukcyjnego na pojemnościowy [6, 7].

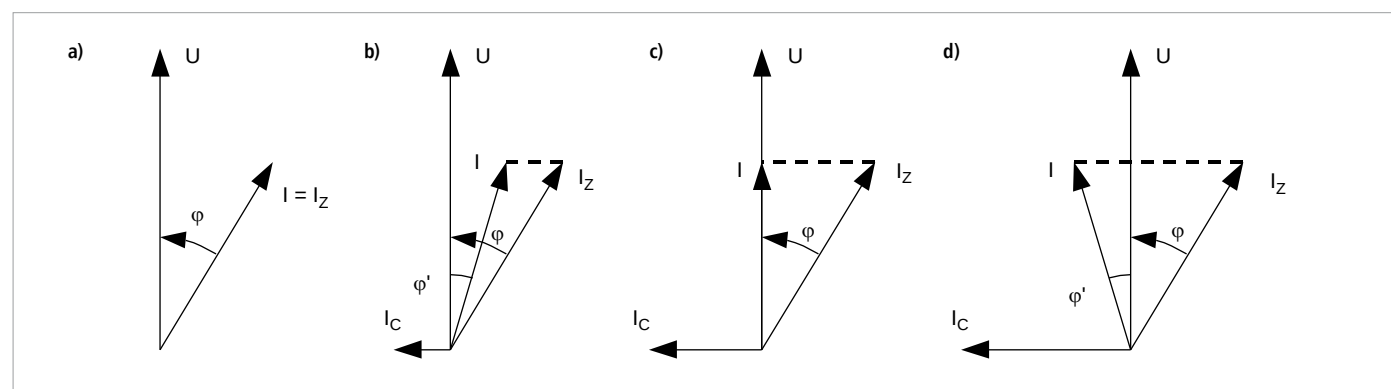
Kompensacja mocy biernej polega na wytworzeniu potrzebnej mocy biernej w pobliżu odbiornika zamiast na przesyłaniu jej siecią elektroenergetyczną. Powoduje to zmniejszenie natężenia prądu w sieci, w wyniku czego następuje zmniejszenie spadku napięcia i straty mocy w liniach przesyłowych. Ponadto wzrost współ-



Rys. 1. Wykresy wskazowe [3]: a) odbiornik o charakterze pojemnościowym ($\varphi < 0$), b) odbiornik o charakterze indukcyjnym ($\varphi > 0$) rys. K. Kuczyński



Rys. 2. Układ do poprawy współczynnika mocy [6], gdzie: Z – odbiornik, C – kondensator kompensujący rys. K. Kuczyński



Rys. 3. Wykresy wektorowe dla [6]: a) braku kompensacji, b) kompensacji częściowej, c) kompensacji całkowitej, d) przekompensowania rys. K. Kuczyński

czynnika mocy pozytywnie wpływa na pracę in-nych odbiorników podłączonych do sieci. Dzięki zmniejszeniu natężenia prądu możliwe jest zmniejszenie przekroju przewodów linii, czyli w efekcie bardziej ekonomiczne wykorzystanie przewodów.

1 Sposoby kompensacji

W celu wyeliminowania niekorzystnych efektów zaczęto stosować baterie kondensatorów podłączone w pobliżu dużych odbiorników o charakterze indukcyjnym, głównie silników asynchronicznych. Poprawna praca układu kompensacyjnego występuje gdy współczynnik mocy osiąga wartość zbliżoną do $\cos\varphi = 0,93$ ($\tan\varphi = 0,4$) poprzez załączanie kolejnych stopni za pomocą regulatora mocy biernej. W praktyce baterie kondensatorów zbudowane są z kilku członów, które dołączane są do sieci elektroenergetycznej tak, by zapewnić utrzymywanie u odbiorcy w miarę stałej i wysokiej wartości współczynnika $\cos\varphi$ [5].

Przed przystąpieniem do projektowania układu baterii do kompensacji mocy biernej warto wykonać analizę wyższych harmonicznych, mierząc ich rozkład widmowy w miejscu projektowanego przyłączenia układu kompensacji. Należy również oszacować wartość prądu, jaki popłynie przez projektowane kondensatory w celu dobrania ich do spodziewanych warunków pracy. Analiza tych zagadnień umożliwia podjęcie decyzji dotyczącej doboru właściwego układu kompensacji mocy biernej. Oznacza to wybór pomiędzy zastosowaniem baterii standardowych, czy też baterii z dławikami wyższych harmonicznych lub baterii dynamicznych [7].

Projektując baterię kondensatorów dla konkretnego przypadku, zaczyna się od obliczenia jej mocy całkowitej, a następnie dobrania mocy pierwszego stopnia tej baterii. Wartość tę należy obliczyć mierząc minimalne przyrosty mocy

biernej w układzie zasilania lub analizując zarejestrowane w czasie pomiarów przyrosty mocy. Należy przy tym uwzględnić fakt, że inną moc będzie miał pierwszy stopień baterii o mocy całkowitej 160 kvar, gdy minimalne przyrosty mocy w układzie zasilania będą wynosiły 50 kW, a inną, gdy będzie to tylko 10 kW. W pierwszym przypadku wystarczy, gdy na pierwszym stopniu zamontowany będzie kondensator o mocy 20 kvar. Jednak ta moc nie zapewnia wysokiej skuteczności procesu kompensacji dla drugiego przypadku. Drugi przypadek wymusza montaż kondensatora o mocy 5 kvar. Różna moc kondensatora na pierwszym stopniu przy zadanej mocy całkowitej wpływa na ilość stopni baterii, a to ma z kolei ogromny wpływ na jej cenę. Z teorii regulacji wynika, że aby zachować ciągłość procesu regulacji przy skokowej zmianie wartości parametru, którym prowadzimy regulację, wartość kolejnego członu nie może być większa niż dwukrotna wartość znajdująca się na poprzednim kroku. Zasada ta znajduje zastosowanie również w konstrukcji baterii kondensatorów. Ustawiając kondensatory w szereg regulacyjny musimy zapewnić, by moc kolejnego stopnia nie była większa niż dwukrotna wartość mocy poprzedniego. Wprowadza się też jeszcze jeden warunek: szereg mocy zastosowanych w baterii kondensatorów nie może być malejący. Ograniczeniem tej zasady „z góry” jest maksymalna moc dostępnych na rynku kondensatorów oraz możliwości łączeniowe stosowanego sprzętu [7].

1 Podsumowanie

Instalacja baterii kondensatorów, przynosi duże oszczędności, poprzez wyeliminowanie opłat za energię bierną. Decydując się na montaż baterii mamy gwarancję dość szybkiego zwrotu poniesionych nakładów, w okresie od kilku do kilkunastu miesięcy eksploatacji. Rozwiązania konstrukcyjne oraz nowoczesne ele-

menty wykorzystane do budowy baterii, zapewniają długoletnią, bezawaryjną i bezpieczną eksploatację. Dodatkową bardzo istotną korzyścią, jaką daje instalacja baterii jest zwiększenie możliwości przesyłowych oraz zmniejszenie strat mocy i spadków napięć w liniach zasilających [8, 9]. Stopnie kondensatorowe mogą być jednakowe, jednak częściej stosowane są zróżnicowane wielkości kondensatorów włączane przez regulator w takiej liczbie i kolejności, aby zminimalizować ilość łączeń przy dochodzeniu do wartości właściwej $\cos\varphi$.

1 Literatura

1. Redefinicja Jednostek SI, GUM, Warszawa 2018.
2. Koszmider A., Olak J., Piotrowski Z., Przekładniki Prądowe. Warszawa, WNT 1985.
3. Nowicz R., Przekładniki napięciowe. Monografia Politechniki Łódzkiej 2003 r.
4. Wiatr J. „Kompensacja mocy biernej indukcyjnej (cz. 1)”, elektr.info 1-2/2006
5. Czajkowski J. „Elektroniczne regulatory mocy biernej”, elektro.info 12/2007
6. Materiały dydaktyczne Politechniki Częstochowskiej
7. Kuczyński K. „Kompensacja mocy biernej w sieciach nn – zagadnienia wybrane”, elektro.info 11/2010.
8. Materiały firm Elektromontex.
9. Materiały firmy Twelve Electric.

ABSTRACT

Solutions of using current transformers and reactive power compensation methods – selected issues
The article discusses the possibilities of using reactive power controllers in compensation systems. Attention was paid to legal requirements for current transformers.

Keywords: ampere standard, current transformer, reactive power compensation.

ANALIZA I POPRAWA JAKOŚCI ENERGII



aktywne filtry harmonicznych
aktywne kompensatory mocy biernej
pomiar i analiza jakości energii



PRO-MAC, ul. Bema 55, 91-492 Łódź, tel. 42 61 61 681, 453 048 839
www.promac.com.pl, biuro@promac.com.pl

ASTAT Sp. z o.o.

60-451 Poznań,
ul. Dąbrowskiego 441
tel. 61 848 88 71
faks 61 848 82 76
info@astat.pl
www.astat.pl

BENNING Power Electronics Sp. z o.o.

05-503 Głusków, ul. Korczunkowa 30
tel. 22 757 84 53, 22 757 36 68-70
biuro@benning.biz
www.benning.pl

ELEKTROBUD S.A.

67-400 Wschowa, ul. Nowopolna 10
tel. 65 547 66 00, faks 65 547 66 09
wschowa@elektrobud.pl
www.elektrobud.pl
www.stacjetransformatorowe.pl

EVER Sp. z o.o.

60-003 Poznań
ul. Wołczyńska 19
tel. 61 650 04 00
faks 61 651 09 27
zapytanie@ever.eu
www.ever.eu

F&F Filipowski sp.k.

ul. Konstantynowska 79/81
95-200 Pabianice, POLSKA
+48 (42) 215 23 83
handlowy@fif.com.pl
www.fif.com.pl

JEAN MUELLER POLSKA Sp. z o.o.

02-293 Warszawa, ul. Krótka 4
tel. 22 751 79 01, 22 868 00 58
info@jeanmueller.pl
www.jeanmueller.pl

LOVATO Electric Sp. z o.o.

55-330 Błonie k. Wrocławia
ul. Zachodnia 3
tel. 71 79 79 010
info@lovatoelectric.pl
www.lovatoelectric.pl

Phoenix Contact Sp. z o.o.

51-317 Wrocław, ul. Bierutowska 57-59
Budynek nr 3/A
tel. 71 39 80 410
www.phoenixcontact.pl

PRO-MAC

91-492 Łódź, ul. Bema 55
tel. 42 61 61 681, 453 048 839
biuro@promac.com.pl
www.promac.com.pl

**Riello Delta Power Sp. z o.o.**

ul. Krasnowolska 82 R
02-849 Warszawa
tel. 22 37 91 700
faks 22 37 91 701
serwis: 22 37 91 720
e-mail: biuro.warszawa@deltapower.pl
serwis.warszawa@deltapower.pl

**SONEL SA**

58-100 Świdnica
ul. Wokulskiego 11
tel. 74 884 10 53
bok@sonel.pl
www.sonel.pl

**Redakcja elektro.info**

04-112 Warszawa, ul. Karczewska 18
tel. 22 810 65 61, faks 22 810 27 42
redakcja@elektro.info.pl
www.elektro.info.pl

