

Analiza techniczna i ekonomiczna kompensacji mocy biernej w zakładzie przemysłowym

Streszczenie. Kompensacja mocy biernej jest wciąż aktualnym zagadnieniem, które może znacząco ograniczyć niekorzystne zjawiska związane z dystrybucją energii elektrycznej w krajowym systemie elektroenergetycznym, wpisując się w trend oszczędzania i efektywnego wykorzystywania energii elektrycznej. W artykule przedstawiono wyniki analizy poboru energii biernej indukcyjnej w dwóch rozdzielniach przemysłowych. Przedstawiono analizę pod kątem wielkości poboru energii biernej jak również kosztów ponoszonych z tego tytułu opłat. W dalszej części przedstawiono analizę skuteczność działania układu kompensującego oraz ekonomiczną ocenę instalacji.

Abstract. Reactive power compensation is still an up-to-date issue that can significantly reduce the unfavorable phenomena related to the distribution of electricity in the national power system, in line with the trend of saving and efficient use of electricity. The article presents the results of the analysis of inductive reactive energy consumption in two industrial switching stations. An analysis is presented in terms of the amount of reactive energy consumption as well as the costs of fees incurred in this regard. The following section presents an analysis of the effectiveness of the compensation system and the economic assessment of the installation. (**Technical and economic analysis of reactive power compensation in an industrial plant**).

Słowa kluczowe: energia bierna, kompensacja mocy biernej, koszty energii, efektywność energetyczna.

Keywords: reactive energy, reactive power compensation, energy costs, energy efficiency.

Wstęp

W związku z aktualnymi wydarzeniami na świecie oraz dynamiczną sytuacją polityczną, zagadnienia związane z optymalizacją kosztów energii elektrycznej stają się coraz bardziej istotne. Zakłady przemysłowe zmagają się obecnie z rosnącymi kosztami produkcji. Dlatego zagadnienia kompensacji mocy biernej w zakładach przemysłowych nabierają na znaczeniu.

Poprawne zarządzanie mocą bierną w sieci zakładowej przynosi wymierne korzyści techniczne i ekonomiczne dla samego zakładu przemysłowego. Właściwe zbilansowanie mocy biernej zapewnia możliwość optymalizacji instalacji poprzez: redukcję przekrojów żył roboczych kabli, uniknięcie przewymiarowania urządzeń, redukcję spadku napięcia w sieci, wzrost dostępnej mocy czynnej na skutek redukcji strat mocy czynnej w transformatorach i liniach zasilających, wzrost przepustowości sieci, możliwość korzystania z aparatów na mniejsze prądy znamionowe, redukcję kosztów energii elektrycznej. Zagadnieniom kompensacji mocy biernej poświęcono wiele miejsca w krajowej literaturze przedmiotowej [1-4]. Kompensacja mocy biernej jest działaniem, które oprócz ograniczenia niekorzystnych zjawisk występujących w sieci przemysłowej wpisując się w obecny wymóg efektywnego użytkownika energią elektryczną oraz konieczności jej oszczędzania [5,6].

Również w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych, zbyt duży przesył mocy biernej powoduje szereg niekorzystnych zjawisk takich jak m.in. zwiększone spadki napięć w transformatorach i liniach zasilających co generuje dla Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD) dodatkowe koszty. Zagadnienia te poruszono m.in. w pracach [7,8]. Tematyka kompensacji mocy biernej jest również analizowana w odniesieniu do europejskich systemów przesyłowych [9,10].

W artykule przedstawiono analizę techniczną oraz ekonomiczną dla dwóch instalacji kompensacji mocy biernej indukcyjnej zainstalowanych na szynach rozdzielnic niskiego napięcia zakładu przemysłowego. Na podstawie analizy przeprowadzonych pomiarów dobrano baterie kondensatorów wraz z układem regulacji: odpowiednio o mocy 325 kvar oraz 725 kvar.

Koszty energii biernej

Obecne przepisy [11] regulują dopuszczalny pobór mocy biernej z systemu elektroenergetycznego poprzez wartość współczynnika $tg \varphi$. Dla większości odbiorców energii elektrycznej rozliczających się z jej ponadnormatywnego poboru nie może ona być większa niż 0,4. Przekroczenie tej wartości powoduje naliczenie dodatkowych opłat za pobór ponadnormatywnej energii biernej określonej w taryfie. W celu zmniejszenia poboru mocy biernej indukcyjnej z systemu elektroenergetycznego stosuje się na ogół proste układy kompensacji mocy biernej, które najczęściej polegają na zainstalowaniu kilku załączanych/wyłaczanych stopni baterii kondensatorów. Obowiązujące rozporządzenia oraz taryfy opłat za energię OSD [11-13] obligują użytkowników końcowych do płacenia za ponadnormatywny pobór energii biernej, natomiast nie wymuszają stosowania układów powodujących zmniejszenie jej poboru.

Ponadumowny pobór energii biernej indukcyjnej przez użytkownika oznacza ilość energii biernej, która odpowiada: współczynnikowi mocy $tg \varphi$ wyższemu od umownego stanowiącemu, nadwyżkę energii biernej indukcyjnej [11]. Wysokość opłat za nadwyżkę energii biernej pobranej ponad ilość wynikającą ze współczynnika $tg \varphi_0$ w okresie rozliczeniowym, wyznacza się zgodnie z zależnością

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

gdzie: Q_b – opłata za nadwyżkę energii biernej wyrażoną w zł, k – wartość ustalana w taryfie, C_{rk} – cena energii elektrycznej obowiązująca w dniu zatwierdzenia taryfy, wyrażona w zł/MWh lub zł/kWh, $tg \varphi$ – współczynnik mocy wynikający z pobranej energii biernej, $tg \varphi_0$ – umowny współczynnik mocy, A – energia czynna pobrana całodobowo lub w strefie czasowej, w której jest prowadzona kontrola poboru energii biernej, wyrażona w MWh lub w kWh.

Analiza techniczna zainstalowanych układów kompensacji mocy biernej zasilania zakładu przemysłowego

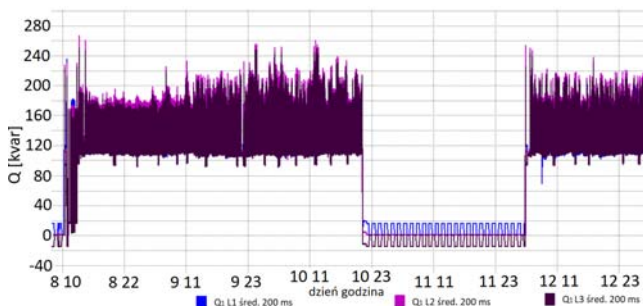
Przedstawiona w artykule analiza dotyczy wybranych wyników pomiarów (mocy biernej oraz $tg \varphi$) pobieranej energii elektrycznej na szynach rozdzielni niskiego napięcia dla dwóch niezależnych układów zasilania zakładu przemysłowego znajdującego się w województwie śląskim.

Cały zakład zasilany jest z dwóch kontenerowych stacji transformatorowych 15/0,4 kV – oznaczonych dalej jako S1 i S2. Moc do tych stacji doprowadzona jest niezależnymi liniami kablowymi z pobliskiego GPZ-u.

W stacji S1 pracują dwa transformatory olejowe, każdy o mocy S_n równej 1600 kVA. Zasilają one dwie sekcje rozdzielnic głównej niskiego napięcia R1 oraz dodatkową rozdzielnicę RD, która może być też awaryjnie zasilana ze stacji S2. Rozdzielnice te zaopatrują w moce odbiory technologiczne takie jak piece, prasy, nagrzewnice, suwnice, pompy, napędy, biura, rozdzielnice lokalne, instalacje oświetleniowe itp.

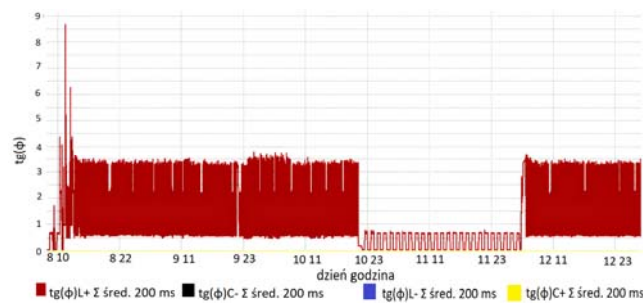
W dalszej części przedstawiono analizę danych pomiarowych uzyskanych z analizatora jakości energii elektrycznej typu Sonel PQM-703. Podczas pomiarów mierzone były wartości średnie napięć, prądów, mocy czynnej i biernej oraz współczynników $tg \varphi$ i $cos \varphi$ w poszczególnych fazach w 200 ms odstępach pomiarowych.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów mocy biernej indukcyjnej na szynach rozdzielni R1.



Rys.1. Pobór mocy biernej indukcyjnej na poszczególnych fazach rozdzielni R1 niskiego napięcia przed kompensacją (pomiar wykonany w okresie od 08.10 do 12.10.2020)

W badanym okresie analizowany zakład pobierał na poszczególnych fazach rozdzielni R1 od około 100 do 220 kvar mocy biernej indukcyjnej. Przełożyło się to na zarejestrowaną wartość $tg \varphi$. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów $tg \varphi$ na szynach rozdzielni R1.



Rys.2. Zarejestrowana wartość $tg \varphi$ w postaci czterokwadrantowej na szynach rozdzielni R1 przed kompensacją (pomiar wykonany w okresie od 08.10 do 12.10.2020)

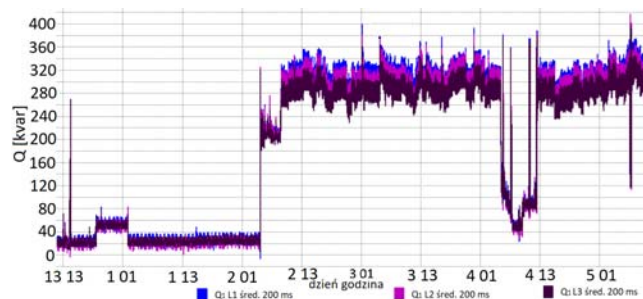
W stacji S2 zainstalowany jest jeden transformator olejowy o mocy S_n równej 1600 kVA. Po stronie niskiego napięcia znajduje się rozdzielnica R2, która zasilą odbiory technologiczne linii produkcyjnej. Do stacji S2 przyłączona była wcześniej bateria kondensatorów o mocy 720 kvar,

która w wyniku uszkodzenia została odstawiona. Urządzenia pracujące oraz ich moce czynne zasilane z rozdzielni R2 przedstawia tabela 1.

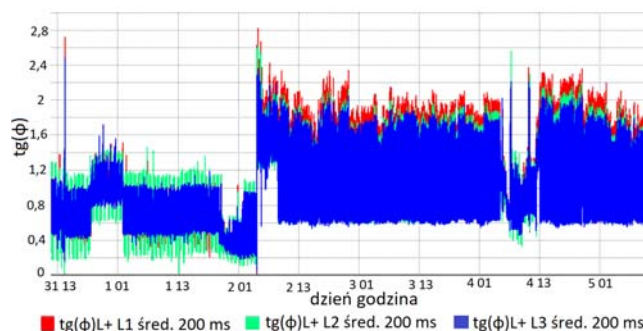
Tab. 1. Zestawienie urządzeń oraz ich mocy zasilanych z R2

L.p.	Odbiornik	Moc [kW]
1	Nagrzewnica gazu	90
2	Piła gorąca	80
3	Piec do matryc IUT	200
4	Piec do matryc Castool	55
5	Piec do starzenia	230
6	Prasa	1300
7	Stół wybiegowy Smith	500
8	Odciąg piły końcowej	15
9	Wentylatory pod pasami gorącymi 2 i 3	50
10	Obiegi wodne	85
11	Pompa powietrza	15
12	Wciągniki Abus	2
13	Rozbijarka do matryc	30
14	Wentylacja pompowni prasy	7
15	Rozdzielnice remontowe	25
	SUMA	2 684

Na rysunkach 3, 4 przedstawiono wyniki pomiarów mocy biernej indukcyjnej oraz $tg \varphi$ w rozdzielni R2.



Rys.3. Pobór mocy biernej indukcyjnej na poszczególnych fazach rozdzielni R2 niskiego napięcia przed kompensacją (pomiar wykonany w okresie od 31.10 do 05.11.2020)



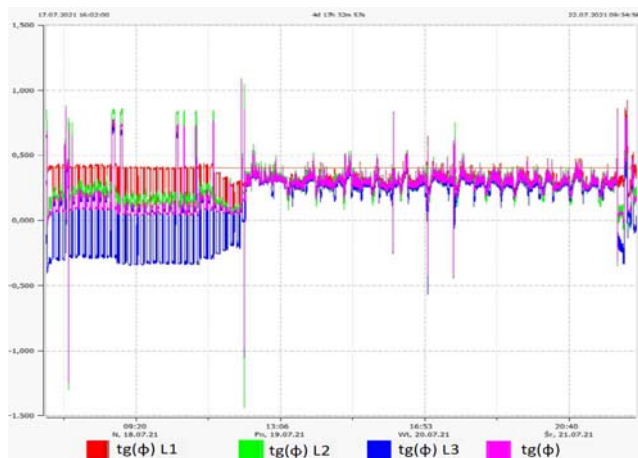
Rys.4. Zarejestrowana wartość $tg \varphi$ na poszczególnych fazach szyn głównych rozdzielni R2 przed kompensacją (pomiar wykonany w okresie od 31.10 do 05.11.2020)

W celu poprawy $tg \varphi$ w obu układach zasilania, zrealizowano szereg czynności projektowych oraz montażowych. Podstawę doboru kondensatorów oraz ich wyposażenia stanowiła analiza parametrów sieci, wykonana wizja lokalna na obiekcie oraz uzgodnienia z inwestorem.

Na podstawie powyższych opracowano projekt wykonawczy, który swoim zakresem obejmuje m.in: przebudowę pól w rozdzielnicach w celu doprowadzenia mocy biernej pojemnościowej z baterii kondensatorów, szczegółowy plan prowadzenia tras kablowych, dobór linii kablowych do baterii kondensatorów, instalację uziemienia, środki ochrony przeciwporażeniowej oraz instalację ochrony przepięciowej. Analizę skuteczności zastosowanej kompensacji przeprowadzono na podstawie pomiarów

weryfikacyjnych mocy biernej oraz $tg \varphi$ wykonanych po zainstalowaniu baterii kondensatorów w rozdzielnicach R1, R2 analizowanego zakładu przemysłowego.

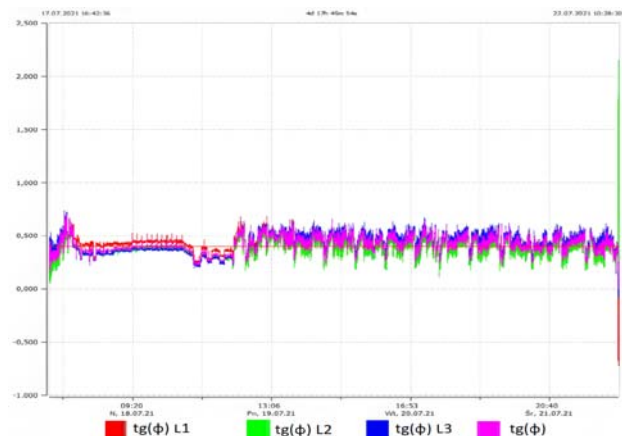
W rozdzielnicy R1 zainstalowany zespół kompensacji składa się z kondensatorów o łącznej mocy 325 kvar, (bateria pięciostopniowa, z najmniejszym stopniem o mocy 25 kvar oraz dławikami 7%).



Rys.5. Zarejestrowany $tg \varphi$ na rozdzielni R1 po wykonaniu kompensacji (pomiar w okresie od 17.07 do 22.07.2021)

W rozdzielnicy R1 przez większość okresu współczynnik mocy utrzymywał się poniżej wartości 0,4 - rzadko przekraczając tą wartość. Istnieje pewne niedokompensowanie, które wskazuje na niewystarczającą moc zainstalowanej baterii.

W przypadku rozdzielnicy R2 pierwszą czynnością był demontaż uszkodzonej baterii kondensatorów. Ułożono nowe kable zasilające do nowej baterii kondensatorów o łącznej mocy 725 kvar, (bateria dziewięciostopniowa, z najmniejszym stopniem o mocy 25 kvar). Na rysunku 6 znajdują się zarejestrowane w trakcie ponad 4 dniowego okresu pomiarowego wykresy współczynnika mocy $tg \varphi$.

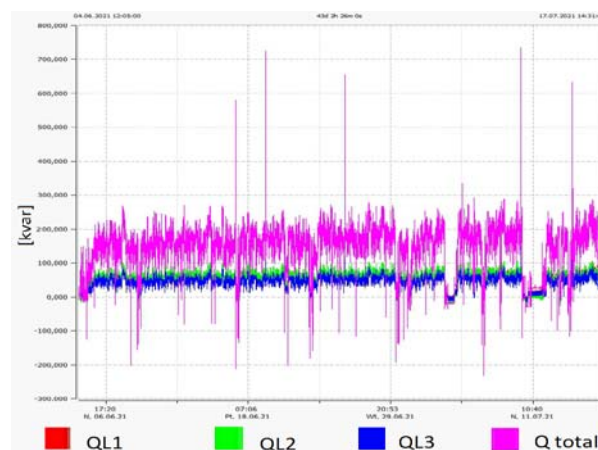


Rys.6. Zarejestrowany $tg \varphi$ na szynach rozdzielni R2 po wykonaniu kompensacji (pomiar w okresie od 17.07 do 22.07.2021)

Przekroczenia wartości 0,4 $tg \varphi$ zdarzały się w momentach spadku obciążenia na tyle rzadko, że regulator nie załączał pierwszego stopnia. Średnia wartość $tg \varphi$ równa 0,2 oznacza pełne skompensowanie mocy biernej indukcyjnej i wystarczającą moc baterii. Współczynnik mocy przez 99% czasu utrzymywał się poniżej wartości 0,4.

W trakcie pomiarów zarejestrowano istotne wahania ilości mocy biernej w sieci co sugeruje dużą zmienność obciążenia. Okresowo zdarzały się odchylenia zarówno w kierunku niedokompensowania jak i przekompensowania.

Na rysunku 7 przedstawione zarejestrowane w trakcie 43 dniowego okresu pomiarowego wykresy mocy biernej na szynach rozdzielni R2.



Rys.7. Pobór mocy biernej na szynach rozdzielni R2 po wykonaniu kompensacji (pomiar w okresie od 04.06 do 17.07.2021)

Bateria kondensatorów przyłączona do rozdzielni R2 jest baterią automatyczną, w której regulator mocy biernej poprzez styczniki załącza i wyłącza poszczególne stopnie. Baterie kondensatorów i cała aparaturę umieszczona w wentylowanej szafie. Brak długotrwałych przekroczeń wartości 0,4 współczynnika mocy po kompensacji przy niskim obciążeniu świadczy o prawidłowym doborze baterii.

Analiza ekonomiczna wdrożenia kompensacji mocy biernej

Głównym celem analizy ekonomicznej dotyczącej kompensacji mocy biernej w rozdzielni zasilanej ze stacji S1 oraz w rozdzielni zasilanej ze stacji S2 analizowanego zakładu jest ocena opłacalności inwestycji i efektywności energetycznej omawianych instalacji. Ze względu na ponoszone koszty za ponadnormatywny pobór energii biernej uszkodzoną baterie w rozdzielni R2 wymieniona na nowy układ kompensacji mocy biernej oraz dołożono kompensacje do rozdzielni R1.

Na podstawie faktur za energię z okresu przed kompensacją przeprowadzono analizę, która pozwoliła ocenić czy inwestycja się zwróci oraz po jakim czasie.

Z punktu widzenia analizy ekonomicznej istotny jest całkowity koszt przedsięwzięcia, a więc kwota pieniędzy za wszystkie prace związane z realizacją inwestycji – projekt, prefabrykacja baterii kondensatorów, przebudowa pół rozdzielnic niskiego napięcia, wykonanie tras kablowych, pomiary, nadzór, itd. W tabeli 2 zestawiono więc całkowite koszty poniesione w związku z realizacją omawianych układów kompensacji mocy biernej indukcyjnej.

Biorąc pod uwagę miesięczne koszty energii indukcyjnej, które zakład przemysłowy nie musi już ponosić oraz koszty inwestycji związane z instalacją baterii kondensatorów wraz z układami regulacji poniesionymi na początku pierwszego miesiąca, wartość bieżącą netto (NPV - Net Present Value) projektu można obliczyć jako [14]

$$(2) \quad NPV = \sum_{t=1}^n CF_t / (1+r)^t - I_0$$

gdzie: CF_t - przepływy gotówkowe (netto) w okresach t eksploatacji inwestycji związane z miesięcznymi nieponiesionymi kosztami za ponadumowny pobór energii biernej, I_0 - koszt inwestycji poniesiony w pierwszym miesiącu analizy, r - roczna stopa dyskonta przyjęta do obliczeń na poziomie 15%.

Wskaźnik *NPV* pomaga ocenić ekonomiczną wykonalność jak również efektywność projektu. Obliczono również okres zwrotu z inwestycji, który określa okres, jaki jest konieczny, aby nakłady poniesione na realizację określonego przedsięwzięcia inwestycyjnego zostały w pełni pokryte korzyściami netto wygenerowanymi przez tą inwestycję [14,15].

W tabeli 2 zestawiono wyniki analizy finansowej inwestycji dotyczącej instalacji kompensacji mocy biernej dla obu rozdzielnic.

Tabela 2. Finansowana analiza zainstalowania kompensacji mocy biernej dla odbiorów zasilanych z rozdzielnic R1 i R2

Rozdzielnia	R1	R2
Liczba analizowanych okresów rozliczeniowych [miesiące]	24	24
Moc zainstalowanych baterii kompensujących [kvar]	325	725
I_0 - całkowity koszt instalacji układu kompensacji mocy biernej netto [zł]	64 600	74 900
<i>NPV</i> [zł]	13 050	232 077
Czas zwrotu z inwestycji [miesiące]	~21	~7

Przeprowadzona analiza finansowa umożliwia wyciągnięcie wniosków dotyczących ekonomicznej zasadności instalowania baterii kondensatorów w konkretnych badanych przypadkach.

Wnioski

W trakcie przeprowadzonych badań zweryfikowano poprawność doboru poszczególnych urządzeń i rozwiązań do panujących na obiekcie warunków zasilania oraz jakości energii w sieci zakładowej. Po analizie dotyczącej prac projektowych, oceniono poprawność wykonania baterii kondensatorów. Ocena wykonania odbyła się w oparciu o oględziny techniczne jak również pomiary termograficzne pracujących baterii kondensatorów. Na podstawie przeprowadzonej analizy można wysunąć ogólne wnioski:

- decyzja o instalacji układu kompensacji mocy biernej, jeżeli nie jest podyktowana wyłącznie względami technicznymi powinna być poprzedzona również analizą ekonomiczną;
- opłacalność instalacji baterii kondensatorów zależy w dużym stopniu od konkretnego przypadku oraz warunków technicznych panujących w miejscu przyłączenia układu;
- częścią całkowitych kosztów układu kompensacji mocy biernej są koszty stałe wynikające z konieczności przeprowadzenia takich prac jak analiza parametrów sieci lub czynności projektowe. Stałe koszty wpływają niekorzystnie na rentowność inwestycji w układach kompensujących o małych mocach znamionowych;
- można mówić o uproszczonej zależności, że im większa jest ilość energii biernej do skompensowania w danym miejscu tym większa opłacalność inwestycji i korzystniejsza stopa zwrotu;

- instalacja układu kompensacji mocy biernej powinna być odpowiednio zabezpieczona i chroniona przed skutkami wyższych harmonicznych [15].

Autorzy: dr hab. inż. Mirosław Kornatka, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: miroslaw.kornatka@pcz.pl; mgr. inż. Radosław Witkowicz, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny (absolwent), al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: radek.witkowicz@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Strzałka-Gołuszka K., Gołuszka M., Strzałka J., Aspekty techniczne i ekonomiczne kompensacji mocy biernej w obiektach użyteczności publicznej, Grupa Medium, Warszawa (2018)
- [2] Bielecki S., Skoczowski T., Potrzeba zmian rozliczeń za moc bierną, *Rynek Energii*, 4 (2015), nr 119, 21-26
- [3] Bielecki S., Problematyka rozliczeń za użytkowanie mocy biernej, *Energetyka*, 11 (2015), 702-705
- [4] Ciura S., Opłaty dystrybucyjne związane z poborem mocy biernej przez odbiorców, *Energia Elektryczna*, nr 2 (2011)
- [5] Kornatka M., Efektywność kompensacji mocy biernej – studium przypadku, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12 (2022), 267-270
- [6] Fryc E., Kochel Z., Krakowiak J., Ziarno R., Możliwości poprawy efektywności wykorzystania energii elektrycznej czynnej i biernej, *Elektroenergetyka – współczesność i rozwój*, nr 1-2 (2012), 78-95
- [7] Bielecki S., Aspekty użytkowania i zarządzania mocą bierną w energetyce, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, (2019)
- [8] Szpyra W., Wpływ mocy biernej na straty w sieci. Energetyczny równoważnik mocy biernej, IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Straty Energii Elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych”, Wisła, (2008), 59-69
- [9] ENTSO-E Overview of Transmission Tariffs in Europe: Synthesis 2020, (2022)
- [10] Kurkowski M., Popławski T., Mirowski J., Energia bierna a przepisy Unii Europejskiej, *Rynek Energii*, 111, (2014), nr 2, 18-23
- [11] 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)
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2007 nr 93 poz. 623 z późniejszymi zmianami)
- [13] Taryfa dla energii elektrycznej w zakresie dystrybucji energii elektrycznej TAURON Dystrybucja S.A. na rok 2023, TAURON Dystrybucja S.A., Kraków, (2023)
- [14] Małecki P., Rosiek K., Żaba-Nieroda R., Metody oceny projektów gospodarczych, *Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie*, Kraków, (2019)
- [15] Dębek M., Iwanicki M.: Wymagania projektowe, dobór oraz sposoby zabezpieczeń dla układów kompensacji w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych zgodnie z normą PN-EN-60871 1, P.B.W. OLMEX S.A.