

## WYKORZYSTANIE BATERII KONDENSATORÓW ZAINSTALOWANYCH W SIECI SN DO OGRANICZENIA START MOCY W SIECI

Agata DZIONK<sup>1</sup>, Robert MAŁKOWSKI<sup>2</sup>, Mirosław WŁAS<sup>3</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. e-mail: agata.dzionk@pg.gda.pl
2. tel.: 58 347 1798, e-mail: robert.malkowski@pg.gda.pl
3. tel.: 58 347 1798, e-mail: miroslaw.wlas@pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań pokazujące możliwości wykorzystania baterii kondensatorów zainstalowanych wewnątrz sieci SN (w odbiorców przemysłowych), w celu zminimalizowania strat mocy w sieci elektroenergetycznej. Wyniki analizy pozwoliły określić, które ze stosowanych obecnie kryteriów regulacji jest najbardziej korzystne. Wskazywano również na konieczność koordynacji działań regulatorów transformatora i baterii kondensatorów.

**Słowa kluczowe:** regulacja napięcia, regulacja mocy biernej, straty mocy, regulator transformatora, regulator baterii kondensatorów.

### 1. WPROWADZENIE

Jednym z głównych zagadnień związanych z optymalizacją pracy sieci SN, jest ograniczenie strat mocy czynnej i biernej. Praca powstała jako jeden z etapów projektu badawczo-rozwojowego pt: *System optymalizacji zużycia, zakupu i dystrybucji energii elektrycznej oraz bilansowania energii elektrycznej na obszarze OSD i w przedsiębiorstwach (MSP) na tym obszarze*, w ramach Działania POIG 1.4 Wsparcie projektów celowych, Programu Innowacyjna Gospodarka, prowadzonym przez NCBiR. W ramach realizacji prac badawczych autorzy analizowali możliwość wykorzystania baterii kondensatorów zainstalowanych w głębi sieci SN do celu ograniczenia strat mocy w sieci. W niniejszym artykule porównano wyniki badań symulacyjnych wybranych kryteriów sterowania baterii kondensatorów. Opisano sposób koordynacji działania regulatorów transformatora zasilającego sieć MV i regulatorów baterii kondensatorów. Zaproponowane rozwiązania przyczyniają się do ograniczenia strat w sieci SN oraz zmienności napięć w sieci SN.

### 2. OPIS ANALIZOWANEJ SIECI

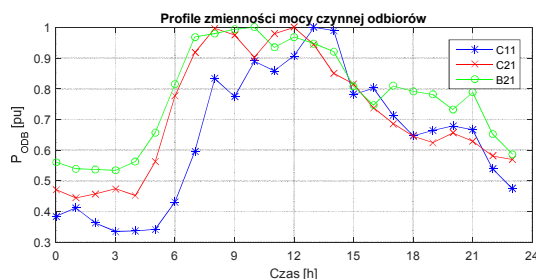
Badania przeprowadzono z wykorzystaniem danych rzeczywistej sieci SN. Analizowana sieć jest siecią kablową, która zasilą obszar przemysłowy. Sieć jest słabo obciążona, co skutkuje znaczną generacją mocy biernej przez linie elektroenergetyczne. Znaczną część odbiorów stanowią silniki asynchroniczne – które są głównymi odbiorcami mocy biernej w sieci. Sieć jest podzielona na dwa podobszary o zbliżonej charakterystyce obciążenia. Oba obszary połączone są długim ciągiem kablowym.

Urządzeniami umożliwiającymi regulację napięcia i/lub mocy biernej w analizowanej sieci są transformator zasilający zainstalowany w stacji GPZ i baterie kondensatorów zainstalowane u odbiorców instytucjonalnych.

### 3. METODYKA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

W celu przeprowadzenia wielowariantowych symulacji badaną sieć zamodelowano w programie Power Factory. Parametry elementów schematu zastępczego odzwierciedlają właściwości rzeczywistych urządzeń. Zmienność obciążenia odtworzono w oparciu o dane pomiarowe oraz typy obciążenia (profil taryfowy). Po gruntownej analizie uzyskanych danych przyjęto następujące założenia:

- Miesiąc bazowy – sierpień. W miesiącu tym zaobserwowano największą zmienność obciążenia sieci.
- Charakterystyka zmienności dobowej mocy czynnej odpowiada charakterystyce z dnia o największej zmienności rys.1. Do porównań przyjęto 4 typy charakterystyk zmienności (C11, C21, B21, B23 – do takich grup taryfowych byli przyporządkowani poszczególni odbiorcy w analizowanej sieci).
- W węzłach z odbiorami potrzeb własnych (PW) założono niezmienną moc odbioru.



Rys. 1. Krzywe zmienności dobowej przyjęte do badań [6]

Zmienność mocy biernej modelowano w następujący sposób:

- Węzły bez kondensatorów – założono pewną, różną dla poszczególnych węzłów, zmienną w czasie wartość współczynnika  $\text{tg}\phi$  w zakresie  $0,1 \div 0,3$ .

- Węzły z bateriami kondensatorów – charakterystykę zmienności dobowej stworzono w taki sposób, aby przy założeniu pracy regulatora baterii kondensatorów z kryterium zadanej wartości współczynnika  $\text{tg}\phi = 0,3$  pracowało, co najmniej 70% zainstalowanych baterii.

W modelach odbiorów uwzględniono podatność napięciową mocy czynnej i bierniej zgodnie z zależnościami.

$$P_i(U) = 0,45 + 0,55 \cdot U_i \quad (1)$$

$$Q_i(U) = 6,8 \cdot U_i^2 - 10,6 \cdot U_i + 4,8 \quad (2)$$

gdzie:

- $P_i$  – moc czynna odbioru w węzle „i”,
- $Q_i$  – moc bierna odbioru w węzle „i”,
- $U_i$  – napięcie w węzle „i”.

Zgodnie z [7] zależności (1) i (2) opisują podatność napięciową mocy odbiorów charakterystyczną dla drobnego przemysłu. Przyjęto ponadto, że:

- regulator transformatora zasilającego utrzymuje zadaną wartość napięcia na szynach SN,
- regulatory baterii kondensatorów działają według kryterium (zależnie od analizowanego wariantu):
  - utrzymania napięcia na zadanym poziomie w węzle przyłączenia,
  - utrzymania stałej wartości współczynnika  $\text{tg}\phi$ .

W dalszej części artykułu przedstawiono wybrane wyniki badań. Syntetyczny opis analizowanych przypadków zawarto w tabeli 1.

Tabela 1. Opis założeń do prezentowanych wyników

Etap 1	Cel – analiza wzajemnej relacji pomiędzy wartością zadaną regulatora napięcia transformatora w stacji GPZ, a wartością zadaną regulatorów baterii kondensatorów.		
	Obiekt regulowany	Kryterium regulacji	Wartość zadana
	Transformator	Napięcie	$U_T^a$
Etap 2	Kondensator	Napięcie	$U_C^b$
	Cel – porównanie skuteczności regulacji baterii kondensatorów dla dwóch kryteriów.		
	Obiekt regulowany	Kryterium regulacji	Wartość zadana
Transformator	Napięcie	$U_T$	
Kondensator	Napięcie	$U_C = U_T$	
	$\text{tg}\phi$	$\text{tg}^c$	

<sup>a</sup> Rozważano trzy wartości zadane napięć dla regulatora transformatora:  $U_T=1,1$ ,  $U_T=1,0$ ,  $U_T=0,9$

<sup>b</sup> Rozważano trzy wartości zadane napięć dla regulatora baterii kond.:  $U_C=1,1$ ,  $U_C=1,0$ ,  $U_C=0,9$

<sup>c</sup> Wartość zadana  $\text{tg}\phi=0,3$  – Wartość maksymalna zawarta w przepisach [6]

Ponieważ rozważanym kryterium optymalizacji było ograniczenie strat mocy, analizowano dwa przypadki:

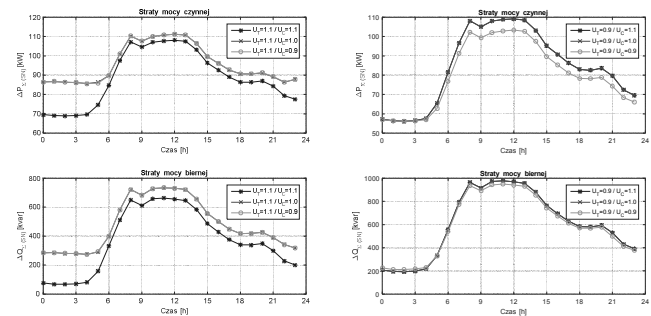
- Przypadek 1 (oznaczony jako  $P_{\Sigma(SN)}$ ,  $Q_{\Sigma(SN)}$ ) – założono, że koszty strat mocy w transformatorach u odbiorców SN/0.4 kV nie obciążają operatora sieci dystrybucyjnej. Najczęstszy przypadek,
- Przypadek 2 (oznaczony jako  $P_{\Sigma(nn)}$ ,  $Q_{\Sigma(nn)}$ ) – założono, że koszty strat mocy w transformatorach u odbiorców SN/0.4 kV pokrywa operator sieci dystrybucyjnej.

## 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

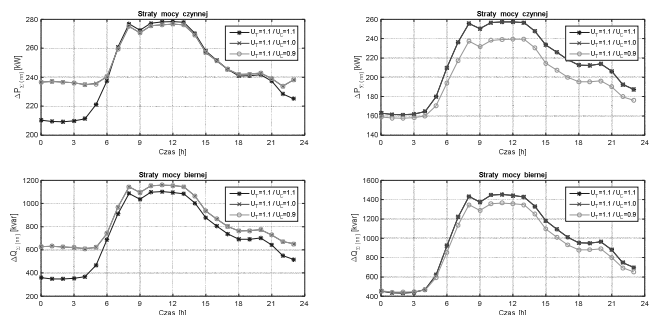
### 4.1. Etap 1

Na rysunku 2 i 3 pokazano wybrane wyniki z pierwszego etapu badań. Zestawiono dwa skrajne

przypadki wartości zadanej napięcia transformatora  $U_T = 1,1$  oraz  $U_T = 0,9$ . Przedstawione wyniki pozwalają zaobserwować pewną zależność pomiędzy wartością zadaną napięcia transformatora zasilającego a wartością zadaną regulatorów baterii kondensatorów zainstalowanych wewnątrz sieci SN.



Rys. 2. Przebieg zmienności sumarycznych strat mocy przy założeniu rozliczeń na poziomie napięcia SN. Wartość zadana napięcia transformatora a)  $U_T = 1,1$ ; b)  $U_T = 0,9$



Rys. 3. Przebieg zmienności sumarycznych strat mocy przy założeniu rozliczeń na poziomie napięcia nn. Wartość zadana napięcia transformatora a)  $U_T = 1,1$ ; b)  $U_T = 0,9$

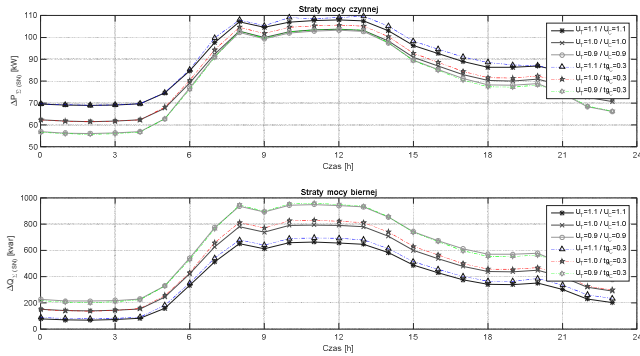
Podstawowym celem tego etapu badań było określenie wzajemnej relacji pomiędzy poziomem napięcia w stacji zasilającej a wartością napięcia utrzymywaną w węzłach, w których zainstalowano baterie kondensatorów. Analiza wyników pokazanych na rysunku 2 i 3 pozwala sformułować następujące wytyczne:

- $U_C = U_T$  – tzn. zadana wartość napięcia  $U_C$  baterii kondensatorów pracujących z kryterium napięciowym powinna być równa zadanej wartości napięcia  $U$  regulatora transformatora pracującego w stacji GPZ.
- Wskazaniem jest utrzymywanie możliwie niskiego poziomu napięcia w sieci.

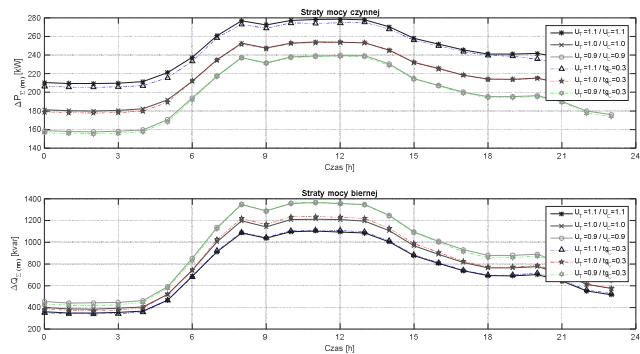
### 4.2. Etap 2

Na rysunkach 4...7 zestawiono wybrane wyniki dla drugiego etapu badań. Na podstawie wniosków z etapu 1 przyjęto założenie równości napięć zadanych regulatora transformatora i regulatora baterii kondensatorów  $U_C = U_T$ .

Analiza wyników przedstawionych na rysunkach 4...7 pozwala porównać skutki działania dwóch kryteriów regulacji baterii kondensatorów. Mając na uwadze skuteczność ograniczenia strat należałoby uznać, że oba rozważane kryteria dają porównywalne rezultaty.

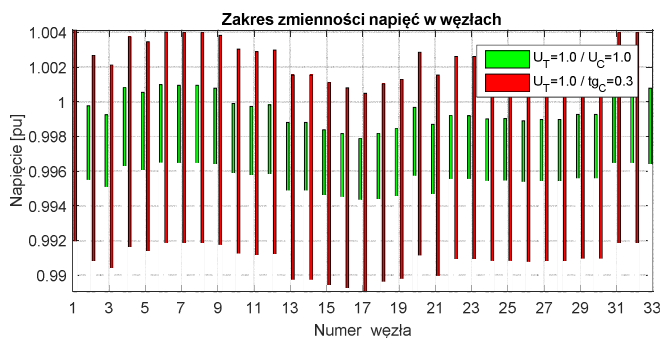


Rys. 4. Porównanie przebiegów zmienności sumarycznych strat mocy dla wybranych kryteriów regulacji. Założono, rozliczenia na poziomie napięcia SN



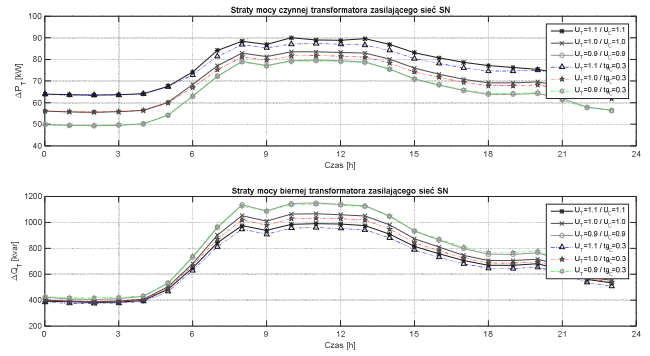
Rys. 5. Porównanie przebiegów zmienności sumarycznych strat mocy dla wybranych kryteriów regulacji. Założono, rozliczenia na poziomie napięcia nn

Praca z kryterium napięciowym, powoduje niewiele większe ograniczenie start od kryterium  $\text{tg}\phi$ . Ma ono jednak dwie dodatkowe zalety. Przy pracy z kryterium napięciowym obserwuje się większą stabilizację napięć w analizowanej sieci (rys. 6) oraz ograniczenie obciążenie transformatora zasilającego (rys. 7).



Rys. 6. Porównanie zakresu zmienności napięć w węzłach przy różnych kryteriach regulacji

Na rysunku 6 widzimy wyraźne ograniczenie zmienności napięć w analizowanej sieci w przypadku zastosowania kryterium napięciowego.



Rys. 7. Przebieg zmienności sumarycznych strat mocy w transformatorze zasilającym, przy założeniu rozliczeń na poziomie napięcia SN

Analizując wyniki zestawione na rysunku 7 można stwierdzić, że praca z  $\text{tg}\phi = 0,3$  daje prawie identyczne rezultaty jak praca z minimalną zadaną wartością napięcia. Jest to spowodowane tym, że praca z taką wartością  $\text{tg}\phi$  skutkuje niskim poziomem napięcia w sieci.

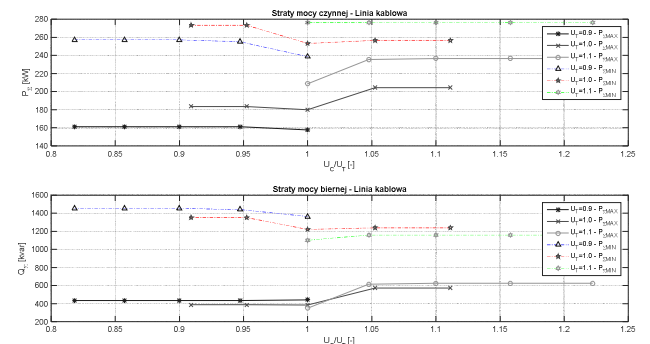
## 5. ANALIZA PORÓWNAWCZA SIECI KABLOWEJ ORAZ NAWIETRZNEJ

### 5.1. Wstęp

Wyniki przedstawione we wcześniejszym rozdziale dotyczą słabo obciążonej sieci kablowej. Charakterystyczną cechą takiej sieci jest generacja dużej ilości mocy biernej przez pojemności doziemne linii kablowej. W celu weryfikacji słuszności wniosku odnośnie koordynacji wartości zadanych napięć regulatorów transformatora i baterii kondensatorów ( $U_T = U_C$ ) badania powtórzone na modelu sieci napowietrznej (linie kablowe zastąpiono liniami napowietrznymi). Badania przeprowadzono przy zastosowanym kryterium napięciowego dla regulatorów baterii kondensatorów.

### 5.2. Sieć kablowa

Na rysunku 8 przedstawiono wykres zmienności strat mocy czynnej i biernej w funkcji stosunku  $U_T/U_C$ . Rozważono dwa skrajne poziomy obciążenia sieci („MAX” – maksymalne obciążenie sieci, „MIN” – minimalne obciążenie sieci). Jeżeli funkcje na wykresach z rysunku 8 osiągną linie poziomą, to oznacza, że skończyły się możliwości regulacyjne baterii kondensatorów.



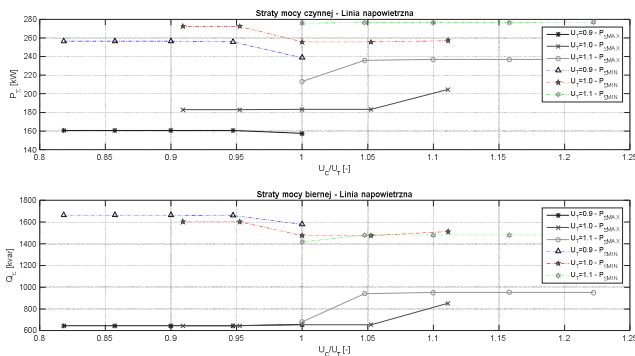
Rys. 8. Wartości sumarycznych strat mocy w funkcji stosunku  $U_T/U_C$  – sieć kablowa

Z rysunku 8 można odczytać, że każda z zaprezentowanych funkcji osiąga minimum przy wartości współczynnika  $U_T/U_C = 1$ . Przedstawione wyniki potwierdzają również, że z punktu widzenia ograniczania start korzystne jest utrzymywanie możliwie niskiego

napięcia w sieci. Niższe napięcie – zwłaszcza przy niedociążonej sieci – ogranicza generację mocy biernej związanej z pojemnością doziemną kabli.

### 5.3. Sieć napowietrzna

Na rysunku 9 przedstawiono wykres zmienności strat mocy czynnej i biernej w funkcji stosunku  $U_T/U_C$  dla sieci z liniami napowietrznymi. Podobnie jak dla wcześniejszego przypadku niezmiennosc charakterystyki (linia pozioma) świadczy o wyczerpaniu się możliwości regulacyjnych baterii kondensatorów.



Rys. 9. Wartości sumarycznych strat mocy w funkcji stosunku  $U_T/U_C$  – sieć napowietrzna

Analiza wyników pokazanych na rysunku 9 pozwala uogólnić wnioski dotyczące konieczności uzależnienia wartości zadanych napięć regulatorów transformatora zasilającego oraz baterii kondensatorów.

### 6. WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań dowodzą, że dzięki właściwej koordynacji działania regulatora transformatora zasilającego sieć SN oraz baterii kondensatorów możliwe jest ograniczenie strat mocy w sieci promieniowej. Dla uzyskania najkorzystniejszych efektów rekomendowanego rozwiązania, autorzy postulują aby:

- wartości zadane  $U_{ref}$  napięć dla wszystkich regulatorów pracujących z kryterium napięciowym były identyczne.
- wartość zadana napięcia była możliwie najniższa.

W pracy porównywano również dwa kryteria regulacji baterii kondensatorów, kryterium:

- stałej wartości współczynnika  $tg\phi$ ,
- stałej wartości napięcia.

Oba kryteria dają porównywalne rezultaty. Autorzy referatu rekomendują jednak zastosowanie kryterium napięciowego. Takie rozwiązanie charakteryzuje się zarówno większym ograniczeniem poziomu strat jak i zmiennością napięć w sieci SN.

Pewnym ograniczeniem zastosowanie rekomendowanego rozwiązania jest potrzeba koordynacji nastaw wszystkich regulatorów. Wymusza to konieczność dystrybucji tej wartości do pozostałych regulatorów. Jednakże, przy dzisiejszym stanie wiedzy i możliwości transmisji danych wymóg ten jest łatwy do spełnienia.

### 7. BIBLIOGRAFIA

1. Dzionk A.: Optymalizacja pracy sieci SN z wykorzystaniem sygnałów z urządzeń pomiarowych zainstalowanych w analizowanej sieci. Praca dyplomowa magisterska, Gdańsk 2015.
2. Kulczycki J., Rudziński M. and Szypra W.: Straty energii jako nieodzowne potrzeby własne sieci. *Acta Energ.*, pp. 63–80, 2009.
3. Muttaqi K. M., Aghaei J., Ganapathy V. and Nezhad A. E.: Technical challenges for electric power industries with implementation of distribution system automation in smart grids. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 46, pp. 129–142, 2015.
4. Toubeau J.-F., Vallée F., De Grève Z. and Lobry J.: A new approach based on the experimental design method for the improvement of the operational efficiency in Medium Voltage distribution networks. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 66, pp. 116–124, 2015.
5. Kot A. and Szypra W. L.: Optymalna regulacja napięcia w sieciach rozdzielczych średniego napięcia. *Acta Energ.*, pp. 89–105, 2009.
6. Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci rozdzielczej. – ENERGA z dnia 01.04.2008 r.
7. Bogucki A.: Podatność częstotliwościowa i napięciowa systemu elektroenergetycznego i jego elementów, Politechnika Śląska, Gliwice 1983.

## ACTIVITY COORDINATION OF CAPACITOR BANKS AND POWER TRANSFORMER CONTROLLERS IN ORDER TO REDUCE POWER LOSSES IN THE MV GRID

One of the main issues related to the optimization of the MV network is to reduce losses of active and reactive power. Lower losses of active and reactive power give not only economic advantage, but also improvement of energy quality. The object of regulation that can be used for these purposes are transformer with On-Load Tap Changer and capacitor's banks.

This paper presents results of analysis of the possibility of using capacitor banks installed inside the MV network (in industrial consumer) in order to minimize power losses in the power network.

The results of analysis allowed to determine which of the criteria adjustment: constant voltage or maintain constant values  $tg\phi$ , in individual buses is better. It was also pointed to the necessity of the coordination between actions of regulators of the transformer and capacitor banks.

**Keywords:** voltage control, reactive power control, Power Losses, transformer controller, capacity banks controller.