

XVIII Seminarium

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE' 2008

Oddział Gdański PTETiS

Referat nr 26

## OCENA WARUNKÓW PRACY BATERII KONDENSATORÓW W SIECI PRZEMYSŁOWEJ

Krzysztof PĘDZISZ

TELE-FONIKA KABLE Sp. z o.o. S.K.A., 30-663 Kraków, ul. Wielicka 114

tel: (12) 652-52-35

fax: (12) 652-52-34

e-mail: krzysztof.pedzisz@tfkable.pl

**Streszczenie:** Baterie kondensatorów są podstawą ekonomicznej pracy systemów zawierających odbiorniki rezystancyjno-indukcyjne. Ponieważ obecnie podobnie często spotykane są odbiorniki nieliniowe, na skutek zaburzeń elektromagnetycznych, pojawiają się nowe rodzaje ryzyka, zarówno wewnątrz, jak i w otoczeniu baterii kondensatorów.

W artykule omówiono warunki pracy baterii kondensatorów, zainstalowanych w stacji transformatorowo-rozdzielczej zakładu przemysłowego, pod kątem zgodności z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki, z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

**Słowa kluczowe:** baterie kondensatorów, jakość energii

– wzrost napięcia na szynach zbiorczych i zadziałanie zabezpieczeń nadnapięciowych.

Zagadnienie jakości energii elektrycznej oraz związane z nim wymagania dotyczące m.in. dopuszczalnych poziomów odkształceń napięć i prądów, wahań wartości napięcia i jego częstotliwości, zapadów oraz impulsów napięcia, generowanych podczas normalnej pracy lub wywołanych przyczynami losowymi, coraz częściej postrzegane są przez odbiorców energii elektrycznej jako ważny element mający wpływ na niezawodność pracy zakładowego systemu elektroenergetycznego oraz stabilność i ciągłość procesu produkcyjnego.

### 1. WPROWADZENIE

Problem prawidłowej kompensacji mocy biernej w zakładach przemysłowych, jest jednym z podstawowych zagadnień z jakim muszą się zmagać służby eksploatacyjne. Skrupulatne rozliczanie przez dostawców ponadumownego poboru energii biernej oraz znaczące podwyżki cen energii sprawiły, że kompensacja mocy biernej stanowi fundament ekonomicznej pracy systemów zawierających odbiorniki rezystancyjno-indukcyjne i jest ważnym elementem gospodarki energetycznej przedsiębiorstw.

Optymalizacja kosztów poprzez m.in. unikanie opłat karnych to nie jedyny powód, dla którego należy posiadać sprawny układ kompensacji. Utrzymanie zadanego współczynnika mocy  $\text{tg}\varphi$  w przedziale  $0,2 \div 0,4$ , kompensacja mocy biernej składowej podstawowej, przyczynia się do wzrostu przesyłanej mocy czynnej (redukcji strat przesyłu mocy czynnej) oraz pozwala w pełni wykorzystać przepustowość transformatorów i elektroenergetycznych kabli zasilających.

Ponieważ obecnie podobnie często spotykane są odbiorniki nieliniowe, pojawiają się nowe rodzaje ryzyka, wewnątrz jak i w otoczeniu baterii kondensatorów:

- przeciążenie kondensatorów,
- rezonans równoległy pojemności z bliskimi (w sensie elektrycznym) indukcyjnościami,
- wzrost poziomu zaburzeń wyższych harmonicznym powyżej wartości normatywnych,

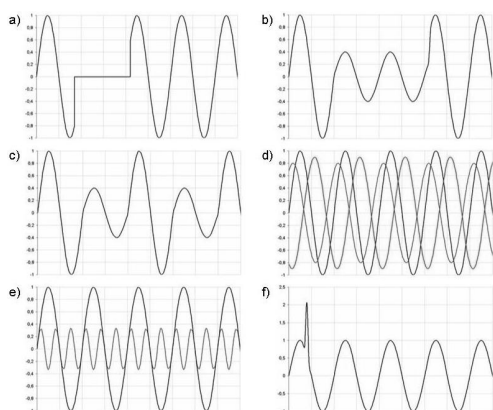
### 2. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Czułość urządzeń technologicznych na jakość zasilającej je energii elektrycznej wzrasta wraz z zaawansowaniem i skomplikowaniem technologii. Wpływ parametrów energii elektrycznej na produktywność i zyskowność odbiorców przemysłowych jest tak duży i zróżnicowany, jak różnorodność wykorzystywanych technologii i urządzeń.

Do najczęściej występujących zaburzeń elektromagnetycznych w środowisku przemysłowym można zaliczyć: zapady napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu, harmoniczne napięcia oraz odkształcenia napięcia (rys.1). Parametry takie, jak: miejsce wystąpienia, wielkość i czas trwania zakłócenia, jak również rodzaj zdarzenia i podatność odbiorów na jego wystąpienie, w sposób znaczący wpływają na jakość energii elektrycznej w sieci zakładowej.

Poziomy dopuszczalnych zaburzeń w przyłączy zakładu przemysłowego, do których przestrzegania zobligowana jest spółka dostarczająca energię elektryczną, określone zostały w *Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego* i normie *PN-EN 50160 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*. Parametry jakościowe energii elektrycznej w środowisku przemysłowym zasadniczo określone są w normie *PN-EN 61000-2-4 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 2-4: Środowisko – Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń*

przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych, a wymagania, dotyczące wewnętrznych miejsc przyłączenia urządzeń w instalacji obiektu przemysłowego oraz wspólnych miejsc połączenia z siecią publiczną, podobne są jak dla sieci publicznych, określone w rozporządzeniu [1] i przypisane do drugiej klasy środowiska elektromagnetycznego.



Rys. 1. Zaburzenia elektromagnetyczne: a) zanik napięcia; b) zapad napięcia; c) fluktuacje napięcia; d) asymetria napięcia; e) harmoniczne napięcia; f) przebiegi przejściowe [2]

Podstawą oceny poszczególnych wskaźników jakościowych energii elektrycznej są tygodniowe pomiary, a rejestrowane parametry, zgodnie z normą [3], obliczane są jako średnie ze zbioru wartości skutecznych kolejnych 20 ms okresów (dla częstotliwości 50 Hz) w 10-minutowych oknach uśredniania.

Monitoring parametrów jakości energii elektrycznej i odpowiednia analiza otrzymanych wyników, jak również zrozumienie skali i złożoności zagadnienia oraz odpowiednie działania mogą przyczynić się, w znacznym stopniu, do lokalizacji i neutralizacji jej negatywnego wpływu na urządzenia i instalacje technologiczne przedsiębiorstwa, prowadząc do poprawy warunków napięciowych w zakładowej sieci elektroenergetycznej.

### 3. ROLA BATERII KONDENSATORÓW

Olbryzmia większość odbiorników prądu przemiennego pobiera z sieci elektroenergetycznej energię czynną i bierną. Energia bierna, w odróżnieniu od energii czynnej przetwarzanej na pracę użyteczną i ciepło strat, nie wykonuje żadnej pracy, jednakże warunkuje działanie wielu odbiorników. Całkowite wyeliminowanie poboru energii biernej i jej przepływu jest niemożliwe, dlatego tak istotnym staje się prawidłowa gospodarka mocą bierną i kompensacja jej negatywnego oddziaływania na urządzenia elektroenergetyczne [4].

Istotą kompensacji mocy biernej jest oddawanie mocy biernej pojemnościowej równoważne z poborem mocy biernej indukcyjnej (lub na odwrót) w miejscu zapotrzebowania na tę ostatnią, co prowadzi do poboru z sieci przez odbiorniki wyłącznie mocy czynnej.

W praktyce wyróżnia się dwie zasadnicze grupy środków kompensacji mocy biernej i poprawy współczynnika mocy. Są to środki naturalne i środki sztuczne. Przy niewielkiej liczbie odbiorników indukcyjnych, dla prostych sieci elektroenergetycznych, zastosowanie naturalnych środków poprawy współczynnika

mocy może okazać się wystarczające do utrzymania wymaganych parametrów, szczególnie gdy wymagania te są niewielkie. W sieciach złożonych, o rozległej i rozbudowanej strukturze, naturalne sposoby kompensacji mocy biernej są niewystarczające i koniecznym staje się stosowanie metod sztucznych korekcji parametrów sieci.

Do naturalnych sposobów poprawy współczynnika mocy można zaliczyć:

- właściwy dobór jednostek transformatorowych,
- właściwy dobór silników asynchronicznych,
- stosowanie silników synchronicznych,
- ograniczenie jałowej pracy odbiorników.

Wśród środków sztucznej poprawy współczynnika mocy biernej, stosowanych w elektroenergetyce, można wyróżnić:

- instalowanie baterii kondensatorów,
- instalowanie kompensatorów wirujących,
- przewzbudzenie silników asynchronicznych synchronizowanych.

Uwzględniając sposób realizacji kompensacji (miejsce, zasięg) w układzie sieciowym, rozróżnia się kompensację centralną, grupową oraz indywidualną.

W wielu przypadkach, ze względu na różnorodność sieci elektroenergetycznej, mając na celu jej poprawne skompensowanie, często rozwiązaniem najlepszym jest kompensacja mieszana, zapewniająca utrzymanie odpowiednich warunków przyłączy i ograniczenie strat przesyłowych. Dla realizacji poszczególnych metod kompensacji konieczne jest spełnienie pewnych uwarunkowań, a o wyborze właściwego rozwiązania decyduje indywidualna analiza danego przypadku.

Aktualnie do najczęściej stosowanych środków korekcji współczynnika mocy zalicza się baterie kondensatorów współpracujące z regulatorem współczynnika mocy.

### 4. CHARAKTERYSTYKA POMIARÓW

Celem przeprowadzonych badań była ocena warunków napięciowych pracy baterii kondensatorów, po rozbudowie i modernizacji parku maszynowego.

Badania, na których została oparta niniejsza analiza, przeprowadzono w stacji transformatorowo-rozdzielczej zakładu przemysłowego, w sekcji pierwszej i drugiej, zasilanych z dwóch transformatorów po 1600 kVA. Obiektami badań były automatyczne baterie kondensatorowe typu BKD-95 (BK1 i BK2), o mocy 450 kVAr każda. Analizę przeprowadzono pod kątem zgodności z *Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego*. Z uwagi na fakt, iż standardy normalizacyjne w Polsce nie są obligatoryjne, normy *PN-EN 50160* i *PN-EN 61000-2-4* posłużyły jako dokumenty pomocnicze.

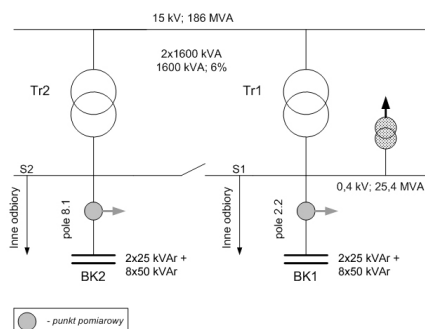
Wymagania przepisów [1], co do poziomu dopuszczalnych zaburzeń w napięciu zasilającym zostały przedstawione w tabeli 1. Dopuszczalne poziomy zaburzeń nie mogą być przekroczone przez 95 % zarejestrowanych wartości, obliczanych jako średnie za okresy 10-minutowe.

Dla każdej z baterii kondensatorów przeprowadzono tygodniowe pomiary. Rejestracje wykonano za pomocą analizatora parametrów jakości energii elektrycznej *FLUKE 1745*, który dodatkowo wyposażony jest w specjalizowane oprogramowanie *PQ Log*.

Tabela 1. Dopuszczalne zaburzenia napięcia zasilającego [1]

Zaburzenie*	Wartość progowa
Zmiana napięcia zasilającego ( $\Delta U/U_N$ )	$\pm 10\%$
Zapady napięcia zasilającego ( $\Delta U/U_N$ )	$10 \div 100\%$
Krótkie przerwy w zasilaniu	$< 3$ min
Asymetria napięcia $U_2/U_1$	2%
Odchylenie częstotliwości	$\pm 1\%$
Harmoniczne napięcia – $THD_U$	8%
Uciążliwość migotania światła	$\leq 1$
Harmoniczna 2	2%
Harmoniczna 3	5%
Harmoniczna 4	1%
Harmoniczna 5	6%
Harmoniczna 7	5%
Harmoniczna 9	1,5%
Harmoniczna 13	3%

\* – zaburzenia przykładowe – wyciąg z rozporządzenia [1]



Rys. 3. Schemat sieci wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

## 5. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Częstotliwość napięcia w analizowanych punktach pomiarowych spełnia wymagania rozporządzenia [1] określone dla podmiotów zaliczanych do grupy przyłączeniowej III. Zarejestrowane zmiany mieszczą się w dopuszczalnym zakresie ( $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ ) nie przekraczając wartości progowych.

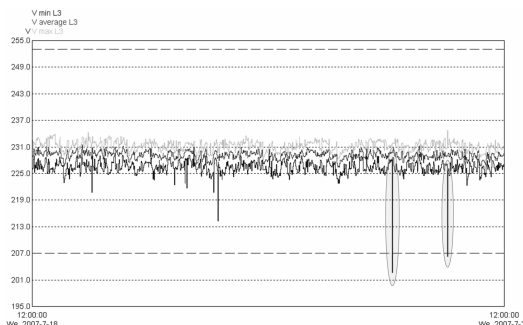
W tabeli 2 przedstawiono zbiorcze zestawienie zarejestrowanych wartości skutecznych napięć fazowych baterii BK2. Zmiany wartości skutecznej napięcia mogą być spowodowane pracą samej baterii kondensatorów – załączanie kolejnych stopni – lub pracą odbiorników zasilanych z kompensowanych sekcji, takich jak: silniki dużych napędów maszyn produkcyjnych, pompy stacji obiegu wody technologicznej oraz suwnice.

Tabela 2. Parametry napięcia zasilającego baterii BK2

U rms	Nr bat.	BK2		
		Faza	L1 [V]	L2 [V]
U min	min	187,66	157,97	209,61
U śr	cp95	228,28	228,75	228,34
U max	max	238,78	238,99	238,78

Przedstawione na rysunku 4 wartości napięcia spełniają wymagania rozporządzenia [1]: w każdym tygodniu 95 % zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego mieści się w przedziale odchylen  $\pm 10\%$  napięcia znamionowego. Wyróżnione obniżenia wartości skutecznej napięcia, poniżej wartości dopuszczalnej

(minimalna wartość z grupy zarejestrowanych pomiarów w czasie 10 min.), spowodowane były zapadami napięcia. W czasie pomiarów, zarówno w przypadku baterii BK1 jak i BK2, analizator parametrów jakości energii elektrycznej zarejestrował po trzy zapady napięcia. Na rysunku 5 zaprezentowany został przykładowy raport, zarejestrowanych zdarzeń w napięciu zasilającym, z ich podziałem ze względu na amplitudę napięcia w czasie zdarzenia i czas jego trwania.



Rys. 4. Wartości skuteczne napięcia fazy L3 – BK1

Phase L1, L2, L3	< 20 ms	20 - < 100 ms	100 - < 500 ms	0,5 - < 1 s	1 - < 3 s	3 - < 20 s	20 - < 60 s	$\geq 1$ min
Swells > 10.00%								
Dip > 10.00%								
10 - < 15 %			1					
15 - < 30 %			1					
30 - < 60 %		1						
60 - < 99 %								
Interruption								

Recording as events from -10.00 / +10.00% of the nominal voltage

Dip according to IEC measurement guide

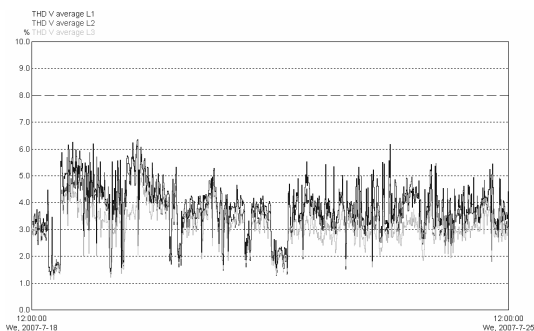
Number of swells 0  
 Number of Dips 3  
 Number of short interruptions (<3 min) 0  
 Number of long interruptions (>=3 min) 0  
 Number of interruptions 0  
 Total events and interruptions 3  
 Total number of allowed events 100  
 Total number of allowed interruptions 100

Rys. 5. Raport zdarzeń w napięciu zasilającym baterii BK2

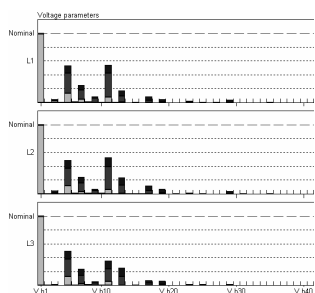
Wahania napięcia zasilającego są powodowane głównie zmianami obciążenia w przemysłowej sieci elektroenergetycznej lub procesami łączeniowymi w sieci zasilającej. Zarejestrowane poziomy wskaźnika długookresowego migotania światła, notuje się na poziomie nie przekraczającym ustalonych rozporządzeniem [1] wartości progowych ( $P_{it} \leq 1$ ).

Asymetria napięcia zasilającego w sieciach trójfazowych jest bardzo istotna, przede wszystkim, z punktu widzenia oddziaływania na pracę urządzeń przyłączonych do niej (np. silniki). Zarejestrowana przez analizator asymetria napięcia w punkcie pomiarowym nie przekracza 1% i spełnia wymagania rozporządzenia [1], zgodnie z którym dopuszczalny przedział współczynnika asymetrii napięcia zasilającego (CP95) powinien zawierać się w granicach od 0 do 2 %.

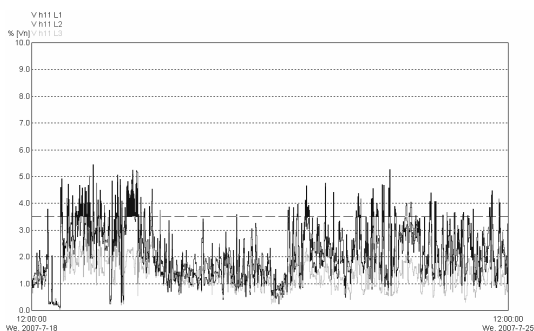
Rejestracja współczynnika odkształcenia napięcia  $THD_U$ , przedstawiona na rysunku 6, wskazuje na niewielki poziom zaburzeń harmonicznym w napięciu zasilającym, których wartość nie przekracza dopuszczalnych 8%. Współczynnik zawartości harmonicznym spełnia wymagania rozporządzenia [1] zarówno w przypadku rejestracji przeprowadzonych dla baterii BK1, jak i BK2. Analizując widmo skumulowanych częstości harmonicznym napięcia zasilającego (rys. 7) można zauważyć, że wartość współczynnika  $THD_U$  tworzą, przede wszystkim, harmoniczne dominujące, a więc 5., 7. i 11., charakterystyczne dla środowiska przemysłowego. Zarejestrowane wartości harmonicznym 11. (rys. 8) przekraczają poziomy określone rozporządzeniem [1].



Rys. 6. Współczynnik odkształcenia napięcia  $THD_U$  – BK1



Rys. 7. Widmo harmonicznych napięcia zasilającego – BK1



Rys. 8. Harmoniczna 11 – BK1

Odształcenia napięcia wymuszają poziomy składowych harmonicznych w prądzie zasilającym, co może powodować nadmierne grzanie się członów kondensatorowych, dalsze odkształcanie krzywej napięcia i w konsekwencji awarii baterii.

## 6. WNIOSKI Z POMIARÓW

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można uznać, że dla istniejącego obciążenia w stacji transformatorowo-rozdzielczej warunki pracy baterii kondensatorów BK1 i BK2 są poprawne.

Odształcenia napięcia, mierzone wartością współczynnika  $THD_U$ , nie przekraczają dopuszczalnych rozporządzeniem [1] i normą [3] wartości, nawet przy maksymalnych prądach obciążenia baterii.

Obserwowany wysoki poziom 11. harmonicznej napięcia zasilającego, baterii BK1, wymusza krytyczny poziom prądu 11. harmonicznej w baterii kondensatorów, który może być przyczyną przegrzewania izolacji kondensatorowej. Wartość 11. harmonicznej napięcia zasilającego baterii BK1 jest jedynym, z punktu widzenia rozporządzenia [1] i normy [3] zarejestrowanym w czasie pomiarów parametrem nie spełniającym ich wymagań.

Moc baterii kondensatorów BK1 i BK2 jest wystarczająca z punktu widzenia kompensacji mocy biernej zasilanych z analizowanej podstacji odbiorników.

## 7. PODSUMOWANIE

W dobie coraz silniejszej konkurencji rynkowej, istotnym i stale zyskującym na znaczeniu elementem gospodarki energetycznej przedsiębiorstw produkcyjnych staje się racjonalizacja zużycia nośników energetycznych, mająca na celu redukcję ich kosztów. Właściwą drogą do osiągnięcia tego celu jest optymalizacja sposobu zakupu i zużycia mediów energetycznych, w tym energii elektrycznej. Gospodarka mocą bierną w obiekcie przemysłowym jest szczególnie istotna i w znacznym stopniu może przyczynić się do redukcji opłat za energię elektryczną przedsiębiorstwa.

Monitorowanie infrastruktury elektroenergetycznej i parametrów energii elektrycznej, jak również zrozumienie skali i złożoności zagadnienia jakości energii elektrycznej, może przyczynić się do lokalizacji i neutralizacji jej wpływu na urządzenia i instalacje technologiczne przedsiębiorstwa.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z dnia 29 maja 2007 r.).
2. LPQI: <http://www.lpqi.org/lwslib/ktwse?page> – link aktualny na dzień 10.02.2008.
3. PN-EN 50160: 2002 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
4. Pacholski E.: Źródła energii biernej. wybór rozwiązań optymalnych ograniczających przepływy energii biernej w elektroenergetycznej sieci KGHM "Polska Miedź" S.A. Referaty naukowo-techniczne ELMA ENERGIA. <http://www.elma-energia.pl/indexpl.php> – link aktualny na dzień 01.04.2008.

## CAPACITOR BANKS OPERATING CONDITION ASSESSMENT IN INDUSTRIAL ELECTRICAL POWER GRID

**Keywords:** capacitor banks, power quality

This paper reviews and presents the findings of voltage disturbances analysis that has an effect on the operation condition of automatic capacitor banks, installed at industrial plant substation, and the consequences on their exploitation and lifetime, such as: voltage variation, voltage sags and interruptions, voltage unbalance in three-phase systems, power frequency deviation and voltage harmonics.