

Kazimierz HERLENDER¹, Maciej ŻEBROWSKI²

Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki (1)
REBUD Sp. z o.o. (2)

Wpływ szybkości komutacji baterii kondensatorów na zawartość wyższych harmonicznych

Streszczenie: *W artykule zaprezentowano możliwość ograniczenia zawartości harmonicznych prądu i napięcia poprzez projektowanie i wykonanie układów kompensacyjnych ściśle dobranych do faktycznych potrzeb układu zasilającego. Zastosowanie kompensacji mocy biernej może przynieść również odpowiednie korzyści ekonomiczne. Właściwy dobór urządzeń do kompensacji mocy biernej nie jest zagadnieniem prostym i wymaga bardzo często podejścia indywidualnego, wynikającego z różnorodności krzywych obciążenia elektrycznego odbiorców energii elektrycznej.*

Słowa kluczowe: kompensacja mocy biernej, rejestracja energii elektrycznej, efektywność energetyczna, wyższe harmoniczne napięcia THDU i prądu THDI.

Wprowadzenie

Z przeprowadzonych badań wynika, że instalując urządzenia do kompensacji mocy biernej można uzyskać prawidłowy efekt w zakresie wymaganego współczynnika mocy ale jednocześnie może się okazać, że w miejscu ich zainstalowania wystąpi wzrost harmonicznych napięcia i prądu, co może być spowodowane nadmiarem pojemności w układzie wynikającym ze zbyt wolnego procesu załączania lub wyłączenia poszczególnych stopni baterii kondensatorów.

Zjawiska te zostaną przedstawione w referacie na konkretnym przykładzie. Pomiar i analizy zostały wykonane w zakładzie produkcyjnym **GEDIA** w Nowej Soli. Analizę przeprowadzono dla typowej prefabrykowanej rozdzielnicy przemysłowej o symbolu R5, o maksymalnej obciążalności do 3000 A. Z rozdzielnicy R5 zasilany jest układ następujących odbiorników:

- prasa CTUA-2500,
- prasa HYLA 1400,
- prasa MW-630,
- prasa ERFURT -630,
- dwie prasy ERFURT – 800.

Największą prasą zasilaną z rozdzielnicy R5 jest prasa hydrauliczna CTUA 2500, którą charakteryzują następujące parametry:

- moc zainstalowana 480 kW, w tym największy silnik 200 kW,
- moc używana średnio 150 kW,
- nacisk prasy 2500 t,
- możliwa teoretyczna częstotliwość cyklu 15,2 s.

Układ kompensacji przed modernizacją

W zakładzie produkcyjnym GEDIA rozdzielnica R5, zainstalowano klasyczny układ kompensacyjny w oparciu o kondensatory energetyczne 3-fazowe, chronione dławikami

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

7%, moc 600 kvar/400V, sposób załączania poszczególnych stopni – stycznik dopasowany do mocy stopnia. Całość zarządzana jest regulatorem współczynnika mocy.

Układ spełniał zadania związane z uzyskaniem efektu ekonomicznego tzn. średnia wartość w okresie rozliczeniowym $\text{tg}\varphi < 0,4$ (brak opłat z tytułu ponadnormatywnego poboru mocy biernej indukcyjnej) (Rys. 1).

Mimo, że zainstalowany układ kompensacji spełniał wymagania dotyczące warunku $\text{tg}\varphi < 0,4$ przeprowadzono szczegółową analizę parametrów sieci nN 0,4 kV w rozdzielni R5 pod kątem gospodarki mocą bierną oraz jakości napięcia zasilającego w/g EN 50160, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości harmonicznych w prądzie (THDI) i napięciu (THDU). W wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że istniejąca kompensacja mocy biernej indukcyjnej pogarsza parametry sieci zasilającej, powodując wzrost udziału harmonicznych napięcia i prądu na szynach rozdzielnic R5, co wynika między innymi ze wzrostu pojemności w układzie. Wpływ pojemności na harmoniczne obrazują poniższe zależności:

- wartości chwilowe napięć i prądów dla k-tej harmonicznej, odpowiednio zależność (1) i (2)

$$(1) \quad u_k = U_k \sqrt{2} \sin (k\omega t + \psi_k)$$

$$(2) \quad i_k = \frac{U_k}{Z_k} \sqrt{2} \sin (k\omega t + \psi_k - \varphi_k)$$

gdzie:

Z_k – moduł impedancji dla k-tej harmonicznej, wyrażony zależnością (3)

$$(3) \quad Z_k = \sqrt{R^2 + X_k^2}$$

- tangens kąta przesunięcia fazowego dla k-tej harmonicznej, zależność (4):

$$(4) \quad \text{tg } \varphi_k = \frac{X_k}{R}$$

gdzie:

X_k – reaktancja pojemnościowa dla k-tej harmonicznej, wyrażona zależnością (5)

$$(5) \quad X_k = - \frac{1}{k\omega C}$$

- tangens kąta przesunięcia fazowego dla k-tej harmonicznej z wykorzystaniem zależności (5), zależność (6):

$$(6) \quad \text{tg}\varphi_k = - \frac{1}{Rk\omega C}$$

Z powyższych zależności wynika, że wraz ze wzrostem pojemności C oraz rzędu harmonicznej maleją wartości reaktancji pojemnościowej X_k , a tym samym moduł impedancji Z_k oraz tangensa kąta przesunięcia fazowego $\text{tg}\varphi_k$. Zmniejszanie się impedancji Z_k powoduje, że wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej wzrasta wartość skuteczna prądu (7):

$$(7) \quad I_k = \frac{U_k}{Z_k}$$

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Z zależności (7) wynika również, że wartość skuteczna prądu dla k-tej harmonicznej wzrasta szybciej niż wartość skuteczna napięcia. Zatem krzywa prądu i płynącego w gałęzi RC jest znacznie bardziej odkształcona od sinusoidy, niż krzywa napięcia u , ponieważ to występująca w układzie pojemność powoduje narastanie wyższych harmonicznych prądu.

Z powyższych zależności wynikają również następujące wnioski:

- Nadmiar pojemności w układzie może prowadzić do niekorzystnych efektów związanych ze wzrostem harmonicznych w układzie, nawet przy spełnionym warunku $\tan\varphi \ll 0,4$ jak i przy przekompensowaniu,
- Pełna kompensacja mocy bierniej, spełniony warunek rezonansu $X_L = X_C$, powoduje, że istniejące w sieci harmoniczne są bardzo podatne na wzmocnienia.

W celu poprawienia zaistniałej sytuacji zaproponowano nowe urządzenie kompensacyjne, które miało ograniczyć te negatywne zjawiska. Inwestor, zainteresowany poprawą jakości napięcia w rozdzielniach oddziałowych, wyraził zgodę na wykonanie nowego układu kompensacji, który zwiększy pewność zasilania, podniesie jego jakość oraz będzie w zgodzie z aktualnie obowiązującymi przepisami w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej, jak i efektywności energetycznej.

Uwarunkowania prawne

W zakresie kompatybilności elektroenergetycznej należy spełnić wymagania zawarte w następujących przepisach prawnych zarówno unijnych jak i krajowych:

- **Dyrektywie Unijnej o kompatybilności elektromagnetycznej 2004/108/WE z 15 grudnia 2004 roku,**
- **Ustawa o kompatybilności elektromagnetycznej - Dz. U. z 2007, Nr 82, poz. 556,**
- **Zestaw norm serii IEC EN 61000 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC).**

W zakresie efektywności elektroenergetycznej należy spełnić wymagania zawarte w następujących przepisach prawnych:

- **Dyrektywa Unijna w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych 2012/27/WE z 25 października 2012 roku,**
- **Ustawa o efektywności energetycznej – Dz. U. z 2011, nr 94, poz. 551,**
- **Monitor Polski z dnia 11 stycznia 2013 roku poz. 15 w sprawie szczegółowego wykazu przedsięwzięć służących poprawie efektywności energetycznej.**

Układ kompensacji po modernizacji

W celu poprawy zaistniałej sytuacji, w zakładzie produkcyjnym GEDIA zainstalowano nowy układ kompensacyjny w postaci baterii kondensatorów energetycznych z dławikami ochronnymi 7% o mocy 600 kvar/400V – człon szybki załączany tyrystorami oraz dodatkowo zwiększono moc baterii o 200 kvar – człon styczny.

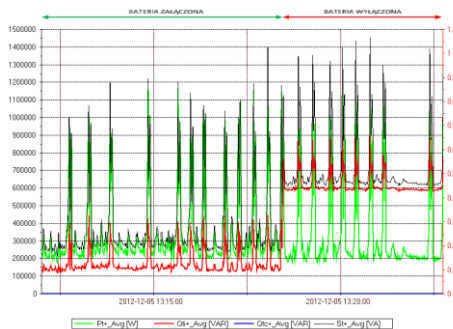
Człon szybki zrealizowany został w oparciu o przełączniki tyrystorowe, które umożliwiają załączanie kondensatorów z czasem 0,2 sekundy. Układ tyrystorowy utrzymujący cały czas napięcie na kondensatorach (brak potrzeby ich rozładowania) oraz podaje właściwe „porcje” energii bierniej pojemnościowej do układu w zależności od potrzeb ustalanych przez automatyczny regulator współczynnika mocy.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

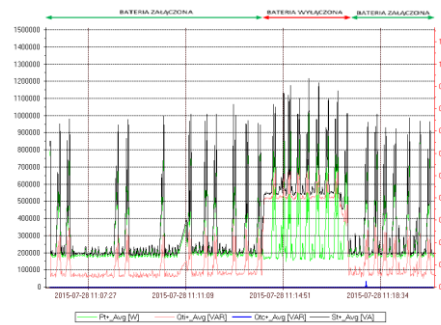
Analiza przebiegów przed i po modernizacji

W celu wykazania różnic wynikających z zastosowania wyżej opisanych dwóch układów kompensacji, poniżej zostaną przedstawione wybrane przebiegi charakterystycznych wielkości zmierzone przed modernizacją i po modernizacji układu do kompensacji mocy biernej.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wykresy bilansu mocy przed wymianą kompensatora i po wymianie kompensatora.



Rys. 1. Bilans mocy przed wymianą kompensatora.



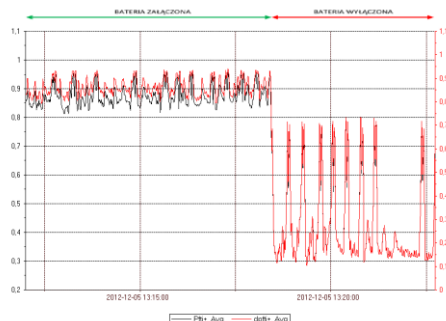
Rys. 2. Bilans mocy po wymianie kompensatora.

Jak widać z przebiegów zamieszczonych na rysunkach 1 i 2, moc bierna indukcyjna przy wyłączonej baterii kondensatorów jak i przy załączonej jest porównywalna. Można przyjąć, że rozdzielnia R5 w czasie pomiarów w 2012 i 2015 roku była podobnie obciążona zarówno co do mocy jak i charakteru odbiorników (park maszynowy zasilany z tej rozdzielni bez istotnych zmian czy modernizacji).

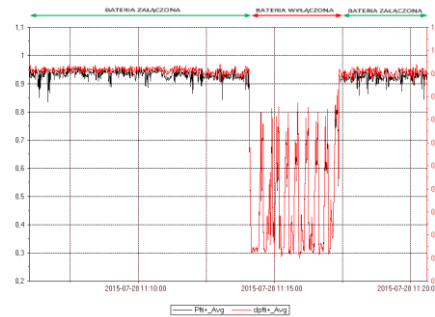
Na rysunkach 3 i 4 zobrazowano przebiegi:

- współczynnika mocy $\cos \varphi$, jako P/S (iloraz mocy czynnej i pozornej) - kolor czarny,
- współczynnik przesunięcia fazowego $\cos \psi$ funkcji prądu i napięcia - kolor czerwony,

przed wymianą kompensatora i po wymianie kompensatora.



Rys. 3. Przebieg współczynnika mocy $\cos \varphi$ oraz $\cos \psi$ przed wymianą kompensatora.

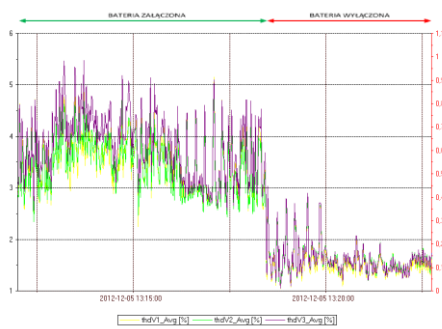


Rys. 4. Przebieg współczynnika mocy $\cos \varphi$ oraz $\cos \psi$ po wymianie kompensatora.

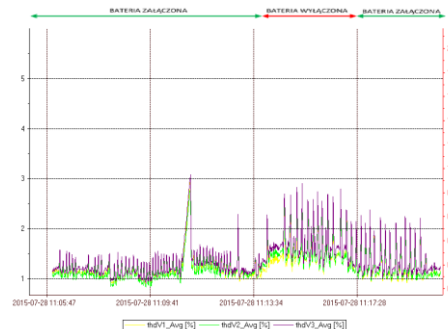
IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Przebieg współczynnika mocy $\cos\varphi$ w układzie przed modernizacją (Rys.3), przy załączonej baterii, wahał się w granicach 0.85-0.95, a jego wartość średnia wynosiła ok. 0,93. Przebieg współczynnika mocy w układzie po modernizacji (Rys.4), przy załączonej baterii, jest bardziej wyrównany i waha się w granicach 0.92-0.97, a jego wartość średnia wynosiła ok. 0,94. Na rysunku 4 widać dodatkowo, że przebiegi wartości $\cos\varphi$ i $\cos\psi$ są bardziej zbieżne (pokrywają się), niż ma to miejsce na rysunku 3.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przebiegi współczynnika THDU przed wymianą kompensatora i po wymianie kompensatora.



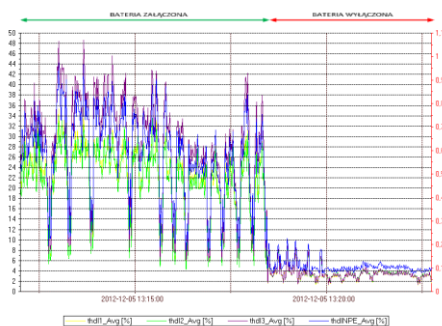
Rys. 5. Przebieg współczynnika THDU [%] przed wymianą kompensatora.



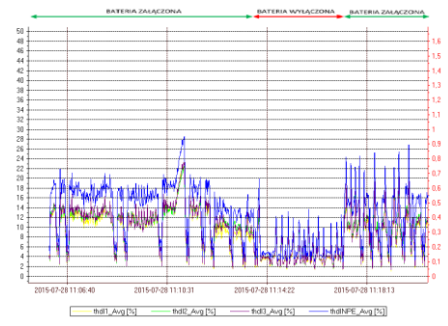
Rys. 6. Przebieg współczynnika THDU [%] po wymianie kompensatora.

Jak widać z przebiegów przedstawionych na rysunkach 5 i 6 wartość współczynnika THDU [%] zawsze wzrasta gdy układ kompensacyjny jest załączony, co pokazuje, że to właśnie załączenie układu kompensacyjnego powoduje generowanie wyższych harmonicznych w miejscu jego zainstalowania. Wartość współczynnika THDU przed wymianą kompensatora wynosiła ok 5 % (Rys. 5), a po wymianie kompensatora uległa znacznemu obniżeniu i wynosiła ok 2,2 %. W obu przypadkach przy wyłączonej baterii współczynnik THDU wynosił ok 1,4 %.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebiegi współczynnika THDI przed wymianą kompensatora i po wymianie kompensatora.



Rys. 7. Przebieg współczynnika THDI [%] przed wymianą kompensatora.



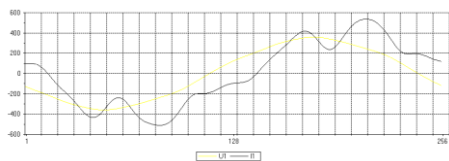
Rys. 8. Wykres nr 8 Współczynnik THDI [%] po wymianie kompensatora.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

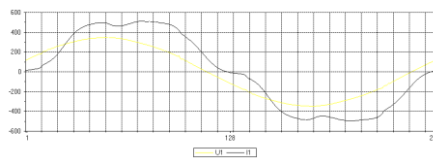
Jak widać z przebiegów przedstawionych na rysunkach 7 i 8 wartość współczynnika THDI [%], podobnie jak współczynnika THDU [%], znacznie wzrasta gdy układ kompensacyjny jest załączony, co pokazuje, że to właśnie załączenie układu kompensacyjnego może powodować generowanie wyższych harmonicznych w miejscu jego zainstalowania.

Wartość współczynnika THDI przy załączonej baterii przed wymianą kompensatora wynosiła ok 44 % (Rys. 7), a po wymianie kompensatora ok 16 % (Rys. 8). W obu przypadkach przy wyłączonej baterii współczynnik THDI wynosił ok 4 %.

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przykładowe oscylogramy napięcia i prądu w fazie L1 przed wymianą kompensatora i po wymianie kompensatora.



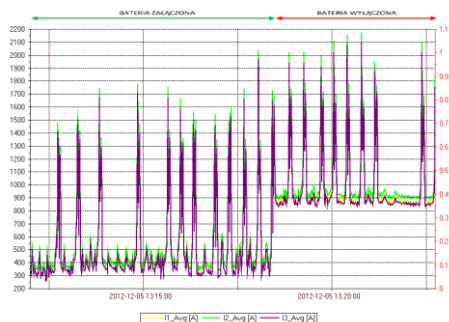
Rys. 9. Przykładowy oscylogram chwilowych wartości prądu $i(t)$ i napięcia $u(t)$ przed wymianą układu kompensacji.



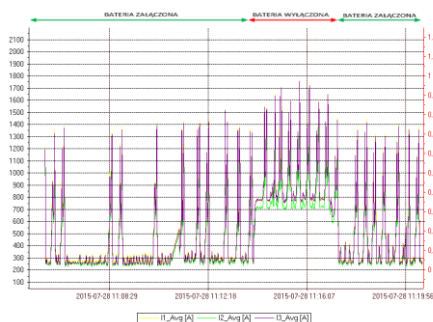
Rys. 10. Przykładowy oscylogram chwilowych wartości prądu $i(t)$ i napięcia $u(t)$ po wymianie układu kompensacji.

Jak widać z przedstawionych na rysunkach 9 i 10 przebiegów chwilowych prądu i napięcia szybka komutacja w znacznym stopniu przybliżyła ich przebiegi do przebiegów o kształcie sinusoidalnym.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów fazowych przed wymianą kompensatora i po wymianie kompensatora.



Rys. 11. Przebiegi prądów fazowych przed wymianą układu kompensacji.



Rys. 12. Przebiegi prądów fazowych po wymianie układu kompensacji.

Analizując wykresy prądów zamieszczone na rysunkach 11 i 12 można zauważyć, że kompensacja jest skuteczna i potrzebna w rozpatrywanym układzie. Wartość prądu przy wyłączonej baterii kondensatorów były na poziomie średnio ok. 900A, natomiast przy załączonej baterii kształtowały się na poziomie ok. 300A. Trzykrotne obniżenie wartości prądu powoduje znaczne ograniczenie strat związanych z przesyłem i transformacją energii elektrycznej.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Wnioski

Z przeprowadzonych pomiarów porównawczych oraz badań wynika, że instalując urządzenia do kompensacji mocy biernej można uzyskać prawidłowy efekt w zakresie wymaganego współczynnika mocy, ale jednocześnie może się okazać, że w miejscu ich zainstalowania wystąpi wzrost harmonicznego napięcia i prądu, co może być spowodowane nadmiarem pojemności w układzie, wynikającym ze zbyt wolnego procesu załączania lub wyłączenia poszczególnych stopni baterii kondensatorów w stosunku do zmian zachodzących w układzie.

Odpowiednio szybkie załączanie członów baterii, można uzyskać stosując przełączniki tyrystorowe, które umożliwiają załączanie kondensatorów z czasem np. 0,2 sekundy. Układ tyrystorowy utrzymujący cały czas napięcie na kondensatorach (brak potrzeby ich rozładowania) oraz podający właściwe „porcje” energii biernej pojemnościowej do układu w zależności od faktycznych potrzeb, ustalanych każdorazowo przez automatyczny regulator współczynnika mocy, może w widoczny sposób, pozytywnie oddziaływać na jakość napięcia zasilającego poprzez ograniczanie zawartość THDU i THDI na szynach rozdzielni.

Kompensacja mocy biernej jest niezbędna nie tylko w zakresie ekonomicznym (obniżanie rachunków za energię elektryczną), ale również służy poprawie efektywności energetycznej. Dodatkowo, przy doborze układów kompensacji mocy biernej należy, analizować szerokie spektrum zjawisk z nią związanych m.in. jakość napięcia zasilającego. Pogarszanie parametrów napięcia zasilającego po przez np. wzrost współczynników THDU i THDI ma negatywny wpływ na pracę urządzeń odbiorczych zasilanych z danej rozdzielni.

Bibliografia

1. Hanzelka Z.: Referaty wybrane. Akademia Górniczo – Hutnicza, Kraków 2000.
2. Hanzelka Z., Piekarz A.: *Załączanie baterii kondensatorów w sieciach niskiego i średniego napięcia*. AGH, Kraków 2000.
3. Markiewicz H.: *Urządzenia Elektroenergetyczne*, Wydanie czwarte. WNT Warszawa 2008.
4. Herlender K., Żebrowski M., *Kompensacja mocy biernej jako jeden z elementów poprawy efektywności energetycznej*, Elektro-Info, nr 12, 2014

Autorzy: dr inż. Kazimierz Herlender, Katedra Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, Wyb. St. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: kazimierz.herlender@pwr.edu.pl
mgr inż. Maciej Żebrowski, REBUD Sp. z o.o, Nowa Sól, e-mail: zebrowski@rebud.pl, www.rebud.pl