

Kompensacja mocy biernej w instalacjach przemysłowych i sieciach dystrybucyjnych SN

Marek Iwanicki

W systemie elektroenergetycznym prądu przemiennego występuje zapotrzebowanie na moc bierną indukcyjną, konieczną do wytworzenia pola elektromagnetycznego, głównie w silnikach elektrycznych i transformatorach. Pole to jest warunkiem działania tych maszyn. Moc bierną pobierają również linie elektroenergetyczne, zużywając ją także na wytworzenie pola elektromagnetycznego.

Zapotrzebowanie na moc bierną występuje zarówno u odbiorców energii elektrycznej (w pierwszym rzędzie u odbiorców przemysłowych), jak również u dostawców energii elektrycznej, tj. w energetyce zawodowej.

Do wytwarzania mocy biernej służą:

- generatory synchroniczne,
- kompensatory synchroniczne,
- silniki synchroniczne,
- baterie kondensatorów (kondensatory).

Kondensatory są zwykle najekonomiczniejszym – z przedstawionych powyżej – źródłem mocy biernej. Mają przy tym wiele cennych zalet, jak:

- możliwość instalacji praktycznie w dowolnym punkcie sieci,
- łatwość dostosowania instalacji do występującego zapotrzebowania,
- bardzo niskie straty mocy czynnej,
- prosty montaż i mało pracochłonna obsługa.

Wymienione zalety kondensatorów umożliwiają instalowanie ich w pobliżu odbiorów jako źródeł dostosowanych do występującego zapotrzebowania mocy biernej w danym punkcie sieci. Unikając zatem praktycznie przesyłu mocy biernej, można zrealizować korzystną ekonomicznie ideę lokalnego wytwarzania tej mocy w dużej liczbie rozproszonych źródeł mocy biernej, którymi są kondensatory, instalowane zarówno w zakładach przemysłowych, jak i w sieciach energetyki zawodowej.

Gospodarka mocą bierną w zakładach przemysłowych

Zmiana sposobu rozliczania nieskompensowanej mocy biernej oraz okresowe podwyżki cen energii elektrycznej sprawiły, że w ciągu ostatnich lat znacznie wzrosło zainteresowanie kompensacją mocy biernej. Optymalizacja kosztów to nie jedyny powód, dla którego należy mieć sprawny układ kompensacji. Utrzymanie zadanego współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ na poziomie poniżej 0,4 pozwala znacznie zmniejszyć straty związane z przesyłem oraz maksymalnie wykorzystać przepustowość transformatorów i kabli zasilających. Skuteczna kompensacja eliminuje opłaty za moc bierną, jak również zwiększa niezawodność układu zasilającego.

Sprawa kompensacji mocy biernej nabiera szczególnego znaczenia tam, gdzie opłaty za energię elektryczną stanowią 20–30% wszystkich kosztów ponoszonych przez odbiorcę w całym procesie produkcyjnym. Mimo że transformatory są dobierane do przewidy-

wanego zapotrzebowania mocy, ich obciążenie zmienia się w dużych granicach w zależności od prowadzonego procesu technologicznego i przyjętego układu sieciowego.

Jednostki napędowe (silniki) przy dużych wahanach obciążeń nie mogą zapewniać optymalnego wykorzystania mocy. Z tych powodów wiele maszyn elektrycznych jest niedociążonych, a niektóre napędy są obciążone znacznie poniżej swojej mocy znamionowej. Wszystko to sprawia, że praca tych maszyn prowadzi do znacznego pogarszania współczynnika mocy czynnej.

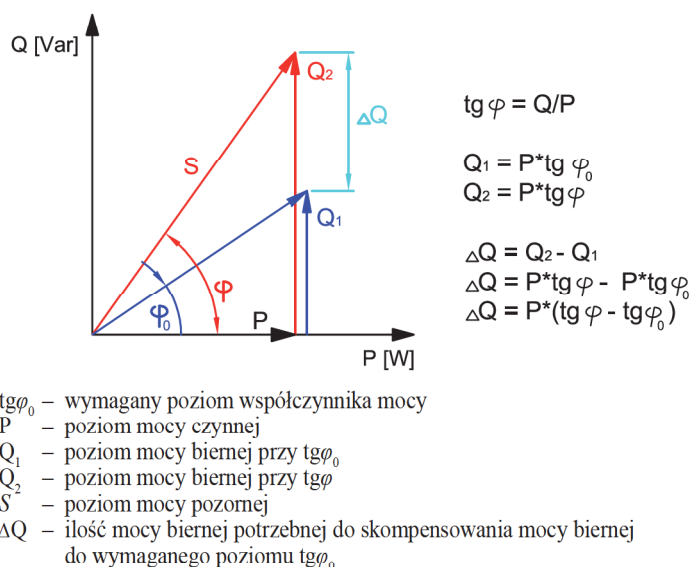
Taki stan rzeczy powoduje znaczny deficyt mocy biernej w układzie elektroenergetycznym, co jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym i wywołuje negatywne skutki w postaci dodatkowego obciążenia cieplnego elementów sieci, zwiększa straty mocy czynnej, powoduje znaczne spadki napięć i wymusza konieczność przewymiarowania przekrojów linii przesyłowych i instalacji elektroenergetycznej.

W celu ograniczenia deficytu mocy biernej należy wykonać:

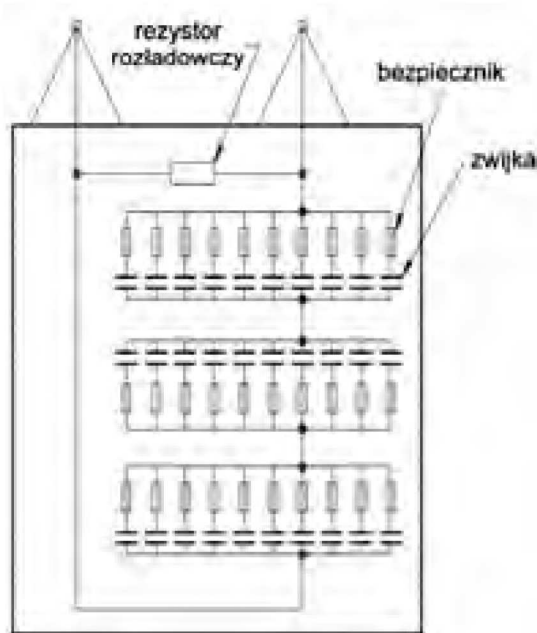
- działania organizacyjno-techniczne, zmierzające do ograniczania poboru mocy biernej,
- kompensację mocy biernej z pomocą baterii kondensatorów do poprawy współczynnika mocy.

Metody kompensacji

Kompensacja mocy biernej w sieci elektroenergetycznej polega na takim skojarzeniu odbiorników energii elektrycznej, by charakter sieci odpowiadał wymaganiom w zakresie utrzymania właściwych parametrów sieci. Najogólniej rzecz ujmując, można stwierdzić, że niekorzystny współczynnik mocy, wynikający z dużego udziału odbiorów o charakterze indukcyjnym może być ograniczany (kompensowany) poprzez włączenie do sieci odbiorników o charakterze pojemnościowym. Ideę kompensacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej w sposób schematyczny przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy przedstawiający kompensację mocy biernej



Rys. 2. Budowa kondensatora – schemat połączeń

W praktyce istnieją dwa sposoby kompensacji mocy bierniej w sieciach elektroenergetycznych. Są to: naturalny sposób poprawy parametrów sieci oraz sztuczny sposób skompensowania sieci.

Dla sieci elektroenergetycznych z niewielką liczbą odbiorów indukcyjnych sposób naturalny może okazać się wystarczający do utrzymania wymaganych parametrów sieci zwłaszcza, gdy wymagania te są niewielkie. W dużych, rozległych i złożonych sieciach elektroenergetycznych ten sposób kompensacji jest już niewystarczający i konieczne jest stosowanie sztucznych metod poprawy parametrów sieci.

Do naturalnych sposobów kompensacji zaliczamy m.in.:

- dobór silników o właściwej mocy i zamiana silników niedociążonych na mniejsze,
- niedopuszczanie do pracy jałowej silników i transformatorów,
- wyłączanie spawarek transformatorowych podczas przerw w spawaniu,
- instalowanie silników synchronicznych zamiast indukcyjnych.

Sztucznymi sposobami kompensacji są:

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

Pod względem zasięgu działań kompensacyjnych i sposobu realizowania kompensacji, można wyróżnić:

- kompensację indywidualną,
- kompensację grupową,
- kompensację centralną.

Kompensacja indywidualna ma odniesienie jedynie do pojedynczych urządzeń (odbiorników indukcyjnych) i nie może służyć kompensacji całej sieci. Stosowanie bowiem jedynie kompensacji indywidualnej dla skompensowania całej rozległej sieci elektroenergetycznej teoretycznie byłoby możliwe, lecz ze względu na dużą liczbę wymaganych zespołów kompensujących musi być wykluczone. Dlatego zastosowanie tej metody kompensacji ogranicza się

jedynie do skompensowania mocy bierniej dużych odpływów indukcyjnych. Do tego rodzaju kompensacji stosowane są najczęściej baterie nieregulowane.

Kompensacja grupowa dotyczy poprawy parametrów pewnych fragmentów sieci i odnosi się do grupy urządzeń (np. odbiory zasilane z jednej rozdzielnicy). Jest to metoda najczęściej stosowana przy wykorzystaniu baterii automatycznych, sterowanych przy użyciu regulatorów mocy bierniej.

Kompensacja centralna ma za zadanie doprowadzić do uzyskania właściwych parametrów sieci postrzeganej od strony zasilania (na przyłączach), nie prowadzi jednak do poprawnego skompensowania całej sieci wewnętrznej. Polega na zastosowaniu jednego urządzenia kompensacyjnego dla całego zakładu lub stacji rozdzielczej. Dzięki temu zminimalizowana jest całkowita moc bierna potrzebna do zainstalowania, natomiast dzięki zastosowaniu regulacji automatycznej wartość współczynnika mocy jest utrzymywana na poziomie zbliżonym do zadanego.

Każda z metod kompensacji może być zastosowana do kompensowania sieci elektroenergetycznej, lecz jej skuteczność jest różna. Dla realizacji poszczególnych metod kompensacji konieczne jest spełnienie pewnych uwarunkowań. O wyborze właściwej metody kompensacji decydują m.in.:

- liczba odbiorów występujących w sieci i wymagających kompensacji,
- liczba przyłączy, dla których muszą zostać spełnione warunki umowne,
- wymagany poziom kompensacji sieci,
- stopień złożoności i rozległości sieci,
- możliwości lokalizacji urządzeń kompensujących,
- rodzaje odbiorów i ich charakter,
- obecność wyższych harmonicznych w sieci elektroenergetycznej i ich poziom.

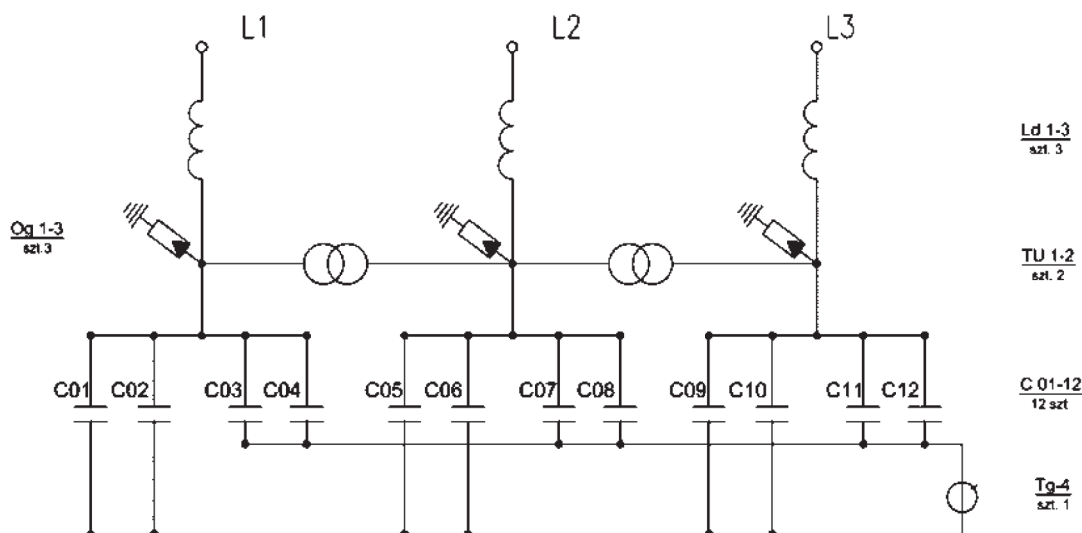
Mając na uwadze poprawne skompensowanie całej sieci wewnętrznej, utrzymanie warunków przyłączy oraz ograniczenie strat przesyłowych, konieczne jest zastosowanie kompensacji mieszanej i to także na różnych poziomach napięć.

Zabezpieczenia baterii

Zadaniem zabezpieczeń baterii kondensatorów jest ochrona samej baterii i sieci przed skutkami zakłóceń i uszkodzeń występujących w baterii, a także – w miarę możliwości – zapobieganie powstawaniu uszkodzeń przez wyłączenie baterii wtedy, gdy występują nieprawidłowe warunki jej pracy, np.: za wysokie napięcie pracy, przeciążenie prądowe, przekroczona temperatura otoczenia.

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN-60871-1:2008 baterie kondensatorów należy zabezpieczyć:

- od zwarć zewnętrznych,
- od zwarć wewnętrznych,
- od przeciążeń,
- od zwarć doziemnych,
- od wzrostu temperatury w pomieszczeniu kondensatorów (dotyczy tylko baterii wewnętrznych),
- od wzrostu napięcia,
- od zaniku napięcia,
- blokadę czasową przed ponownym załączeniem (600 s).



Rys. 3. Schemat ideowy baterii kondensatorów w układzie YY

Zabezpieczenie od zwarć zewnętrznych

Do zabezpieczeń baterii kondensatorów przed skutkami zwarć zewnętrznych stosuje się przekaźniki działające na wyłącznik główny. Zabezpieczenia te nie powinny reagować na prąd załączania baterii kondensatorów. Przekaźniki zasilane są z przekładników prądowych załączonych w obwód główny baterii kondensatorowej lub w obwód wydzielonej jej części (każdego członu).

Zabezpieczenie przed skutkami zwarć wewnętrznych

Z punktu widzenia działania zabezpieczeń bardzo ważne są zjawiska występujące przy zwarciach. Zwarcia międzyfazowe i doziemne na połączeniach oraz aparatach rozdzielczych baterii nie różnią się od zwarć tego typu występujących w innych urządzeniach elektroenergetycznych. Natomiast zwarcia wewnątrz jednostek kondensatorowych, zwane dalej zvarciami wewnętrznymi, wymagają szerszego omówienia.

Najczęstszym przypadkiem uszkodzenia baterii jest zwarcie wewnętrzne, polegające na przebiciu dielektryka w zwijce kondensatorowej. Zwarcie zwijki jest w pierwszym jej stadium zvarciem łukowym. Łuk zamyka obwód RLC, w którym występuje rozładowanie energii elektrycznej nagromadzonej w zwijkach równolegle pracujących ze zwijką zwartą. Rozładowanie ma charakter oscylacyjny o dużej częstotliwości (rzędu kilku kiloherców), przy których niejednokrotnie występują przepięcia niebezpieczne dla zwijek zdrowych. Ciepło wytworzone w miejscu zwarcia powoduje stopniowe zwęglenie dielektryka i nadtopienie folii. W jednostkach mających bezpieczniki na zwijkach, zwarcie zwijki powoduje zadziałanie jej bezpiecznika i wyłączenie zwijki. Pojemność jednostki maleje, a zdrowe zwijki pracują nadal.

W kondensatorach niewyposażonych w bezpieczniki na zwijkach, zwarcie jednej z nich prowadzi zwykle do stopniowego zniszczenia całej jednostki. Powodem tego są termiczne i chemiczne zjawiska występujące w zwartej zwierce oraz zmiana napięciowych warunków pracy zwijek zdrowych. Szkodliwe działanie ciepłe jest oczywiste. Przez miejsce zwarcia płynie cały prąd jednostki kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt razy większy od prądu znamionowego zwijki. Ciepło wydzielane na rezystancji zwartej zwijki powoduje podniesienie jej temperatury. Wzrasta również temperatura pracy sąsiednich zwijek, które wskutek tego są narażone na przyspieszone starzenie się dielektryka i w końcu jego uszkodzenie.

Zwarcie jednej zwijki bocnikuje całą grupę zwijek pracujących równolegle. Powoduje to zmianę rozkładu napięcia na szeregowo połączonych grupach wewnątrz jednostki. Zwijki zdrowe pracują wtedy przy napięciu najczęściej przekraczającym 110% ich napięcia znamionowego, co znacznie zwiększa prawdopodobieństwo uszkodzenia. Zwarcie jednej grupy zwijek w jednostce zbudowanej z kilku grup zwijek połączonych szeregowo powoduje zwiększenie pojemności jednostki. Tym samym rośnie również moc jednostki i są wydzielane straty czynne. Prowadzi to do zwiększenia temperatury jednostki i skrócenia trwałości zwijek zdrowych. Zrozumiałe jest, że wszystkie wymienione czynniki działające równocześnie prowadzą do kolejnych zwarć w dalszych zwijkach aż do pełnego zwarcia jednostki. Powstaje przy tym duża ilość gazów, które podnoszą ciśnienie wewnątrz obudowy kondensatora, mogą doprowadzić do jego rozerwania.

Do zabezpieczenia baterii od skutków zwarć wewnętrznych stosowane są zabezpieczenia wykorzystujące pomiar asymetrii prądu poprzez przekładnik prądowy (najczęściej o przekładni 5/5 A) zabudowany w połączeniu YY.

Zabezpieczenie przed przeciążeniami prądowymi

Zabezpieczenie przed przeciążeniem prądowym powinno wyłączyć baterię kondensatorową przy utrzymującym się przez pewien czas prądzie o wartości $1,3 \times I_n$.

Zabezpieczenie przed skutkami zwarć jednofazowych do ziemi

Zabezpieczenie przed skutkami zwarć jednofazowych można wykonać jako normalne ziemnozwarciowe. W polach zasilających baterie kondensatorów należy zainstalować przekładnik Ferrantiego współpracujący z zabezpieczeniami, które jednocześnie powinny chronić całą baterię (w tym kable) przed skutkami zwarć doziemnych.

Zabezpieczenie od wzrostu temperatury w pomieszczeniu kondensatorów (dotyczy baterii wewnętrznych)

Zabezpieczenie takie należy instalować tam, gdzie zachodzi możliwość przekroczenia najwyższej dopuszczalnej temperatury otoczenia, przy czym należy uwzględnić klasę temperaturową dla kondensatorów według tabeli I.

TABELA I. Symbole określające górną granicę zakresu temperatury

Symbol (klasa temperaturowa)	Temperatura powietrza otaczającego [°C]		
	wartość maksymalna	najwyższa wartość średnia w danym okresie	
		24 h	1 rok
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

Zabezpieczenie przed skutkami przeciążeń napięciowych

Zabezpieczenie od skutków przeciążeń nadnapięciowych (wzrostu napięcia) realizowane za pomocą przekładnika nadnapięciowego zwłocznego, zasilanego z przekładników napięciowych w polu pomiarowym. Zabezpieczenie powinno działać na wyłączenie baterii (tab. II).

TABELA II. Dopuszczalne poziomy napięć w eksploatacji

Współczynnik napięciowy $\times U_n$ (wartość skuteczna)	Maksymalny czas trwania
1,00	długotrwale
1,10	12 h w ciągu każdych 24 h
1,15	30 min w ciągu każdych 24 h
1,20	5 min
1,30	1 min

Zabezpieczenie podnapięciowe

Zabezpieczenie podnapięciowe jest zasilane z przekładników napięciowych w polu pomiarowym jako bezwzględnie działające na wyłączenie baterii. Każdy chwilowy zanik napięcia i ponowny jego powrót powoduje, że kondensatory mogą być nierozładowane i ponownie naładowane „w przeciwfazie”, co może spowodować ich uszkodzenie.

Blokada czasowa przed ponownym załączeniem

Ponowne załączenie baterii do sieci dopuszcza się tylko wtedy, gdy napięcie szczytkowe na kondensatorach nie przekracza 10% na-

pięcia znamionowego. Zaleca się, aby czas ponownego załączenia baterii nie był krótszy niż 10 min. W przypadku baterii regulowanych automatycznie, baterie należy wyposażyć w blokadę czasową przed ponownym załączeniem.

Zgodnie z normą PN-EN-60871-1:2008 każda jednostka kondensatorowa powinna być rozładowana do napięcia 75 V lub mniejszego, z wartości znamionowej w czasie do 10 min.

Ograniczenie przepięć przy załączaniu baterii kondensatorów

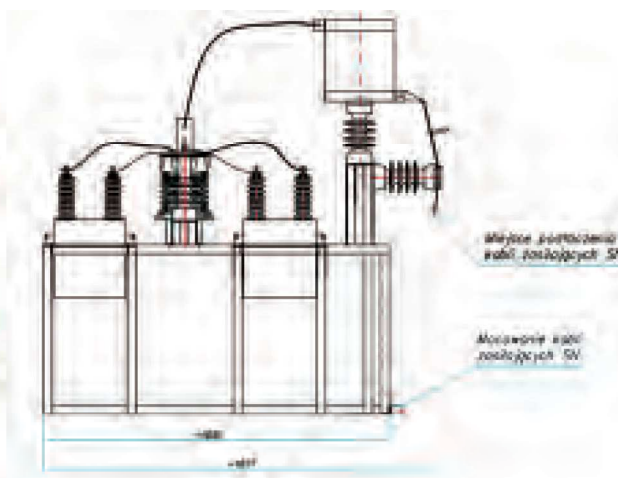
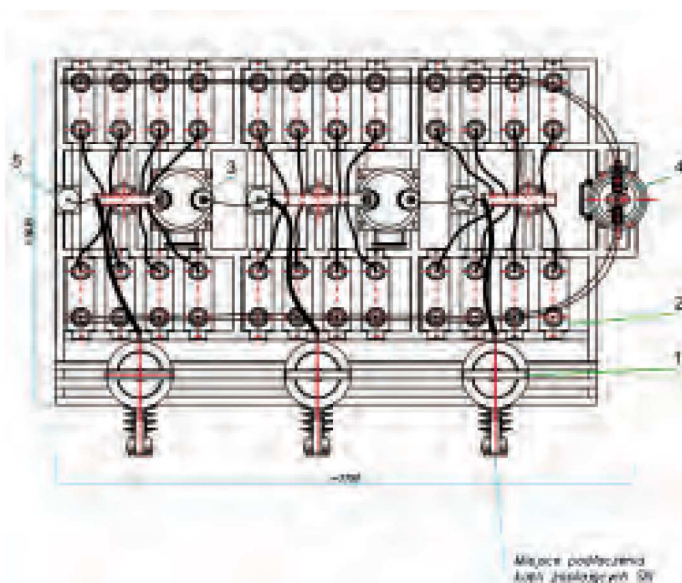
Zastosowane ograniczniki przepięć skutecznie obniżają przepięcia występujące podczas łączenia baterii kondensatorów przy przekroczeniu poziomu maksymalnego napięcia pracy U_c .

Ograniczenie wartości przetężeń przy załączaniu baterii kondensatorów

Przy załączaniu kolejnych baterii kondensatorów do systemu, w którym już pracują baterie kondensatorów występują przetężenia, często o bardzo dużych wartościach, dochodzących do 100 i większych krotności prądów znamionowych poszczególnych członów baterii. Ograniczenia wartości przetężeń przy załączaniu kolejnych członów baterii kondensatorów uzyskamy poprzez dławiki ograniczające lub przeciwrezonansowe, włączone szeregowo z kondensatorami. Widok baterii kondensatorów wyposażonej w dławiki ograniczające został przedstawiony na rysunku 5.

Budowa układu kompensacji mocy biernej w sieci przemysłowej lub dystrybucyjnej powinna być realizowana na podstawie dokumentacji projektowej uwzględniającej specyfikę danego obiektu. Projekt baterii kondensatorów powinien zawierać:

- dobór wielkości znamionowych baterii,
- sprawdzenie możliwości wystąpienia rezonansu baterii z siecią zasilającą,
- schemat podłączenia baterii do rozdzielnic,
- dobór zabezpieczeń i łącznika głównego w polu zasilającym baterię,
- obliczenia oraz nastawy zabezpieczeń,
- dobór i plan ułożenia kabli,
- dobór przewodów łączących zabezpieczenie z przekładnikiem w połączeniu międzygwiazdowym,



Rys. 4. Widok stanowiska wewnętrznej baterii kondensatorów SN



Rys. 5. Widok baterii kondensatorów BKS-6 z dławikami ograniczającymi prądy łączeniowe

- lokalizację baterii,
- wytyczne budowlane,
- sposób wykonania ochrony przeciwporażeniowej.

W celu zapewnienia prawidłowej i niezawodnej pracy baterii na etapie projektu powinniśmy przeprowadzić poniższe pomiary oraz wyliczenia:

- Przed doбором baterii kondensatorów należy wykonać pomiary określające poziom wyższych harmonicznych oraz sprawdzić, czy w danym punkcie przyłączenia baterii do sieci nie ma możliwości wystąpienia rezonansu z jedną z harmonicznych, powodującego niedopuszczalne przeciążenie kondensatorów ($1,3 I_n$), które może spowodować uszkodzenie baterii. W razie stwierdzenia możliwości wystąpienia rezonansu należy zastosować odpowiednie środki zapobiegawcze, np. poprzez zabudowę dławików tłumiących.

- Należy sprawdzić, czy nie występuje możliwość załączania baterii kondensatorów do równoległej już pracującej baterii w sieci (np. na GPZ należy uwzględnić możliwość pracy równoległej baterii na dwóch sekcjach przy zamkniętym sprzęgle).

W przypadku, gdy bateria załączana jest do innych, już będących pod napięciem, baterii kondensatorów mogą występować przejściowe przeciążenia prądowe o dużej amplitudzie i wysokiej częstotliwości. W celu obniżenia przejściowych przeciążeń prądowych do wielkości odpowiadającej kondensatorowi i jego wyposażeniu, konieczne jest załączanie kondensatorów przez zainstalowane dławiki w obwodzie zasilania baterii. Zaleca się, aby wartość szczytowa przeciążeń prądowych, wynikająca z czynności łączeniowych była ograniczona i nie przekraczała maksymalnej wartości $100 \times I_n$ (wartość skuteczna).

Próbné załączenie baterii

Po zamontowaniu układu kompensacji, zgodnie z dokumentacją projektową, możemy przystąpić do próbnego załączenia baterii kondensatorów. Podczas próbnego załączenia baterii należy:

- sprawdzić równomierności poboru prądu w każdej fazie, wartości nie powinny się różnić między sobą więcej niż to wynika z asymetrii napięcia zasilania i pojemności fazowych baterii,

- sprawdzić ustalony prąd baterii, który nie powinien być większy niż $1,3$ prądu znamionowego baterii i nie powinien ulegać zmianom w czasie z innych przyczyn niż zmiana napięcia w sieci,
- sprawdzić prąd udarowy, którego wartość nie powinna przekraczać wartości odpowiadającej wytrzymałości dynamicznej zwarciowej urządzeń współpracujących z baterią,
- wykonać pomiar wyższych harmonicznych w sieci oraz w torze zasilania baterii,
- przeprowadzić pomiar prądu z przekładników prądowych w torze zasilania baterii oraz przekładnika prądowego w połączeniu międzygwiazdowym,
- wykonać korektę czasów oraz nastaw zabezpieczeń na podstawie zarejestrowanych przebiegów łączeniowych.

Podsumowanie

Przeprowadzenie procesu związanego z wyborem optymalnego sposobu kompensacji, zaprojektowanie układu z uwzględnieniem właściwych zabezpieczeń oraz przeprowadzenie pozytywnego rozruchu baterii pozwala na stwierdzenie właściwego rozwiązania problemu kompensacji mocy biernej na danym obiekcie. Tak dobrany i uruchomiony układ powinien zapewnić długą i niezawodną pracę.

LITERATURA

- [1] Hanzelka Z., Klempka R.: Pasywne filtry wyższych harmonicznych. *NiS 2000* nr 9–10
- [2] Nartowski Z.: Baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej. WNT, Warszawa 1967
- [3] Pacholski E.: Kompensacja mocy biernej w przemysłowych układach zasilających rozdzielczych z napędami synchronicznymi na przykładzie KGHM „Polska Miedź” SA. Seminarium naukowo-techniczne, Lubiatów 2001
- [4] Plamitzer A.M.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1986
- [5] PN-EN 60871-1:2008 Kondensatory do równoległej kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym powyżej 1000 V
- [6] PN-EN 61921:2005 Kondensatory energetyczne. Baterie kondensatorów niskiego napięcia do poprawy współczynnika mocy
- [7] Poradnik inżyniera elektryka. Tom 3. WNT, Warszawa 1997

CIEKAWA PRACA DLA PROGRAMISTÓW

W USA uważa się, że najgorszy czas recesji już minął. O ciekawą pracę nie muszą się martwić inżynierowie elektrycy, zwłaszcza ze znajomością programowania. Podobnie w Europie – londyńskie Centrum Ekonomii i Badań Biznesowych (Centre for Economics and Business Research) szacuje, że w samym tylko obszarze przetwarzania komputerowego opartego na użytkowaniu usług dostarczanych przez zewnętrzne organizacje – nazywanym „chmurą obliczeniową” (cloud computing), powstanie w Europie do 2015 r. 2,4 mln nowych miejsc pracy. (wb-401)



EEE Spectrum (US) 2011 September