

Piotr BOGUSŁAWSKI
Eugeniusz ŁOWIEC

WIELOPOZIOMOWY KOMPENSATOR ZAPADÓW NAPIĘCIA Z SUPERKONDENSATOROWYM ZASOBNIKIEM ENERGII – WYBRANE ASPEKTY KONSTRUKCYJNE^{*)}

STRESZCZENIE *Artykuł dotyczy problematyki integracji odnawialnych źródeł energii w dystrybucyjnych systemach zasilania. Opisano urządzenie, które wraz z wieloplatformowym oprogramowaniem może stać się podzespołem sieciowym aktywnie wpływającym zarówno na poprawę jakości energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, jak i na bilans mocy sieci z takimi źródłami. Przedstawiono wybrane aspekty konstrukcji układu kompensatora z przekształtnikiem o strukturze wielopoziomowej, które mogą uprościć realizację powyższych celów.*

Słowa kluczowe: *superkondensator, przekształtnik wielopoziomowy, zdalne sterowanie, rozproszone zasoby energii, FACTS*

1. WSTĘP

Pierwotnymi czynnikami powodującymi wzrost zainteresowania odnawialnymi systemami wytwarzania energii są wysokie ceny paliw kopalnych

^{*)}*Praca finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach realizacji projektu badawczego specjalnego nr COST/255/2006.*

mgr inż. Piotr BOGUSŁAWSKI
e-mail: piotr.boguslawski@iel.gda.pl

mgr inż. Eugeniusz ŁOWIEC
e-mail: eugeniusz.lowiec@iel.gda.pl

Instytut Elektrotechniki, Oddział w Gdańsku

i obowiązujące umowy międzynarodowe dotyczące wielkości emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Wobec procesów związanych z liberalizacją rynków energii i postępami technologii półprzewodnikowych, następuje wzrost zainteresowania automatycznymi systemami zwiększającymi pewność i jakość dostaw energii elektrycznej. Powstawanie elektronicznych systemów pozwalających na udział energii z rozproszonych źródeł odnawialnych (ang. distributed energy resource - DER) jest dalszym przejawem ewolucji energetycznych systemów dystrybucji.

Do znaczących źródeł odnawialnych zaliczyć należy przede wszystkim energię wiatru i słońca oraz zdobywające coraz większą popularność układy kogeneracyjne z turbinami gazowymi (ang. Combined Heat and Power - CHP), a także ogniwa paliwowe [1]. Z punktu widzenia energetyki zawodowej źródła tego typu cechują się jednak niską jakością i mniejszą pewnością dostawy energii, jak i niekorzystną geograficznie lokalizacją generacji. W konsekwencji postęp technologiczny w pozyskiwaniu energii z tych źródeł i ich praktyczne wykorzystanie na dużą skalę, w niektórych krajach zaczęły niekorzystnie wpływać na systemy dystrybucji energii, dotąd strukturalnie nie przystosowane do obsługi tak znaczących, dwukierunkowych przepływów mocy. Negatywne zjawiska w tych sieciach uwidoczniły się już w krajach rozwiniętych technologicznie, zwłaszcza w Danii za sprawą znacznego udziału energetyki wiatrowej w bilansie energetycznym tego kraju [2].

Powyższe czynniki wpływają na rosnące koszty operatorów systemów dystrybucji (DSO), dotąd wykonujących czynności konfiguracyjne głównie ręcznie. Do czynności tych należą: wpływanie na parametry sieciowe (układy połączeń sieci, wartości napięć), pomiary rozptyłów mocy i ich ograniczanie, nastawy zabezpieczeń, ustalanie harmonogramów pracy transformatorów oraz współpraca z innymi operatorami. Obserwacje tendencji rozwojowych mogą skłaniać do wniosku, że w przyszłości DSO muszą oddać sterowanie sieciami pod „dyktą” znacznej liczby niewielkich dostawców w swoich sieciach, podobnie jak obecnie operatorzy krajowych systemów przesyłowych uczynili to wobec licznych spółek dystrybucyjnych. W USA już uwidoczniły się problemy szeroko pojętej integracji technologicznej rozproszonych źródeł energii ze względu na znaczne różnice w standardach energetycznych pomiędzy poszczególnymi stanami. Wg danych w [3] i [4] aktywny udział działań legislacyjnych i ustawowe ułatwienia do rynku energii dla niewielkich producentów w stanie Kalifornia (USA) mają zwiększyć udział solarnych źródeł energii do roku 2017 o 3000 MW mocy zainstalowanej.

Wolumeny energii, którymi operuje się na rynku bilansującym ulegają ciągłemu zmniejszaniu, a okresy bilansowania są skracane. Także procedury

„dostępu do rynku” stają się coraz prostsze [5]. Wobec większej dostępności, np. technologii fotowoltaicznych, rosnąć będą moce produkcyjne źródeł zainstalowanych w sieciach odbiorczych a drobni producenci będą mieli coraz większe szanse na dołączanie do rynku energii.

2. KOMPENSATOR TYPU OFF-LINE JAKO DER

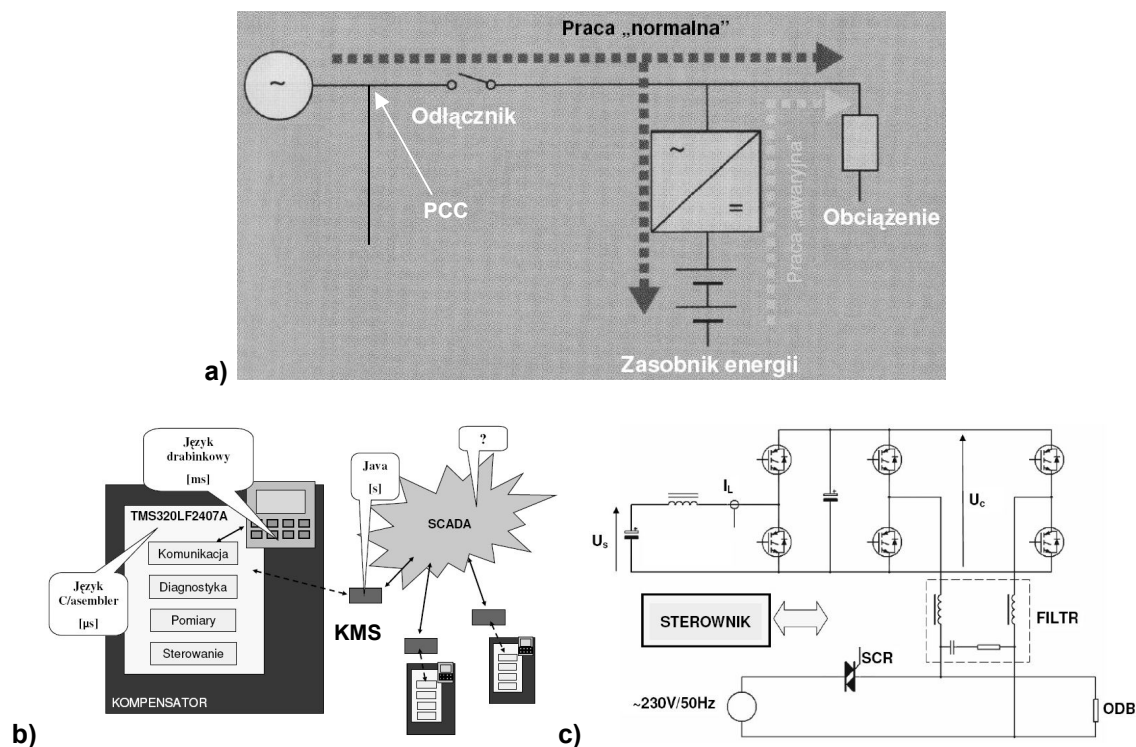
Obecnie w wielu lokalnych systemach energetycznych rozważa się możliwość pracy wyspowej. Wynika to z konieczności zabezpieczenia się przed katastrofalnymi skutkami awarii systemowej (tzw. blackout). Energia magazynu opisywanego urządzenia kompensacyjnego uzupełniana jest z zewnętrznej sieci energetycznej lub z lokalnego źródła generacyjnego (odnawialnego). W tym ostatnim przypadku kompensator można traktować jako element typu DER, a ten fragment sieci określić jako „microgrid” - zespół źródeł i odbiorów energii połączonych z większą siecią (macrogrid) lecz mogących pracować niezależnie od niej. Wobec powyższego kompensator może stać się dla takiej sieci elementem aktywnie wpływającym na niezawodność [6]. Zarządzanie takim podsystemem i złożoność obliczeniowa regulatorów wymaga rozbudowanej nadrzędnej infrastruktury sterowania.

Podstawowym zadaniem kompensatora zapadów napięcia typu off-line (lub line-interactive) jest uzupełnianie niedoborów mocy czynnej i biernej w wydzielonym obszarze sieci dystrybucyjnej energią pochodzącą z własnego magazynu (rys.1a). Kompensator zlokalizowany jest w sieci o topologii promieniowej (sieć nn lub SN) i oddzielony od punktu wspólnego przyłączenia systemu energetycznego (ang. Point of Common Coupling - PCC) przez odłącznik [1]. Odłącznik pozwala na automatyczną rekonfigurację sieci umożliwiając pracę wyspową co oznacza możliwość automatyzacji konfiguracji sieci w obszarze działania DSO.

Zastosowanie łącznika powoduje konieczność minimalizacji mocy biernej wymienianej z systemem energetycznym, gdyż wyłączenie obciążeń indukcyjnych stanowi zagrożenie dla odłącznika zrealizowanego w technice półprzewodnikowej lub utrudnia gaszenie łuku w układach stykowych [8].

Nadrzędne funkcje kompensatora związane z samoczynną optymalizacją nastaw regulatorów i są mniej krytyczne czasowo. Zasoby modułów komunikacyjnych (ozn. KMS) pozwolą na stworzenie takiej sieci w oparciu o dedykowane łącza lub sieć Internet. Większa złożoność obliczeniowa

i implementacyjna wymaga (standardowych) platform sprzętowych o odpowiedniej mocy obliczeniowej.



Rys. 1. Kompensator typu off-line: a) sieć dystrybucyjna z kompensatorem: źródło napięcia, łącznik, zasobnik (DER) z układem DC/AC, sieć odbiorcza, b) zadania sterownika, narzędzia ich programowania i przepływ sygnałów w rozproszonym systemie zasilania (znak zapytania ozn. specjalizowane narzędzia informatyki energetycznej) c) schemat prototypu jednofazowego

Czynnikiem o kluczowym znaczeniu dla DER jest infrastruktura komunikacyjna pozwalająca m.in. na zdalne rekonfiguracje sieci lub monitorowanie produkcji energii w czasie rzeczywistym. W przykładowym przedsięwzięciu związanym z optymalizacją pracy rozproszonych źródeł energii, głównie systemów fotowoltaicznych, kogeneracyjnych i mikroturbin gazowych na terenie Kalifornii (USA), wskazano oprogramowanie agentowe (Smart*DER) jako efektywne narzędzie integracji złożonych systemów sterowania [4] i [12]. Na rys.1b przedstawiono elementy składowe sterownika prototypu kompensatora zaników napięcia [9]. Każdy z nich stanowi niezależny podsystem komputerowy zdolny do realizacji funkcji komunikacyjnych umożliwiając integrację zespołu kompensatorów we wspólnej sieci urządzeń w czasie rzeczywistym.

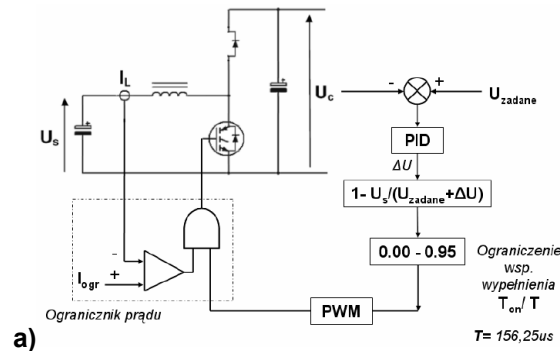
2.1. Opis procedur sterujących kompensatorem

W układzie sterowania jednofazowym kompensatorem z przekształtnikiem dwupoziomowym dokonano podziału zadań oprogramowania z uwzględnieniem stałych czasowych zachodzących procesów fizycznych i nadrzędnych celów sterowania. Do zadań tych należą: sterowanie, pomiary, diagnostyka i komunikacja zrealizowane w prototypie w technice cyfrowej za pomocą procesora sygnałowego (rys.1b). Oprogramowanie wykorzystuje mechanizm przerwania czasowych o zmiennej podstawie czasu pochodzących od przetwornika analogowo-cyfrowego mikrokontrolera. Wyodrębniono następujące zadania sterowania wykonywane w pojedynczym obiegu programu obsługi przerwania (ISR):

1. Kondycjonowanie i normalizacja zakresów roboczych sygnałów wejściowych.
2. Wykrywanie aktualnego stanu kompensatora (pomiary napięć i prądów w układzie, pomiary amplitudy i częstotliwości napięcia sieciowego na wejściu przekształtnika).
3. Podejmowanie decyzji o zmianie stanu układu.
4. Realizacja bieżących obliczeń (pętle regulacyjne napięcia, prądu, częstotliwości).
5. Aktualizacja zmiennych roboczych (tzw. „obraz procesu”) i wyjściowych sygnałów sterujących.

Przyjęto, że kompensator może znajdować się w trzech podstawowych stanach pracy (ładowanie zasobnika, oczekiwanie, rozładowanie zasobnika - generacja). Zmiana stanu nie zmienia szablonu struktury ISR lecz jedynie poszczególne elementy składowe w ramach wyżej opisanych sekwencji działania. Przyjęte rozwiązanie umożliwia pseudorównoległą wymianę informacji pomiędzy głównym algorytmem kompensatora a innym podsystemem poprzez blok pamięci o wspólnym dostępie. Stanowi to typowy mechanizm komunikacyjny stosowany w układach master-slave.

Zadanie diagnostyki przekształtników energoelektronicznych, zrealizowanych na modułach tranzystorowych IGBT (tzw. inteligentnych - IPM), w oprogramowaniu jednofazowego modelu z falownikiem dwupoziomowym ograniczono do badania stanu wyjść „error” modułów tranzystorowych, w pętli głównej programu. W układzie wielopoziomowym celowe będzie rozbudowanie tego mechanizmu z wykorzystaniem niezależnych od kontrolera sprzętowych układów zabezpieczających.



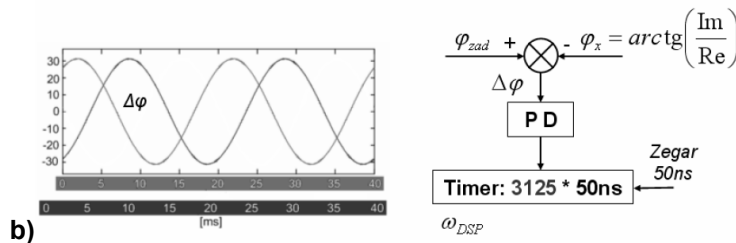
$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega t + \varphi)$$

φ_x

Dyskretna transformata Fouriera (DFT) przebiegu odstrojonego:

$$X(1) = \sum_{n=0}^{127} x(n) \left[\cos(2\pi \cdot n / 128) - j \sin(2\pi \cdot n / 128) \right]$$

$\{Re\}$ $\{Im\}$



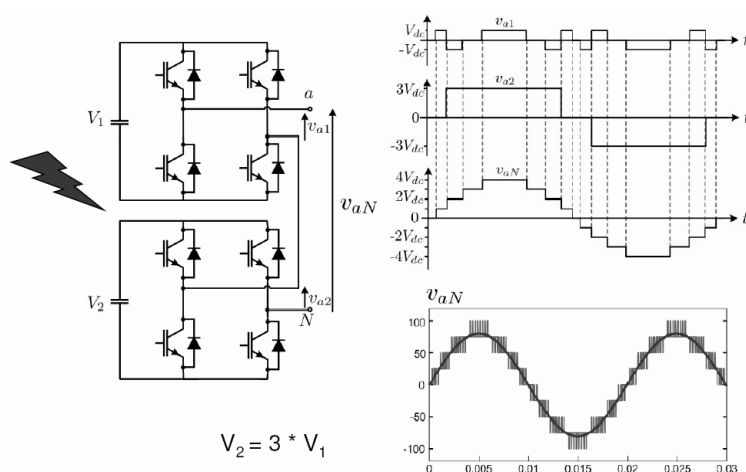
Rys. 2. Pętle regulacyjne kompensatora: a) stabilizacja napięcia pośredniczącego w układzie DC/DC, b) idea cyfrowej realizacji stabilizatora fazy generowanego napięcia $u(t)$ [7]

Obsługa komunikacji z systemem nadrzędnym polega na odczycie i zapisie zmiennych „obrazu procesu” (mapa pamięci) i realizowana jest w mikrokontrolerze w procedurze obsługi przerwania sprzętowego o najniższym priorytecie. W pamięci tej zdefiniowano parametry i zmienne robocze aktualizowane lub odczytywane w zadaniach sterowania opisanych powyżej. Zaimplementowana w mikrokontrolerze wewnętrzna mapa pamięci kompensatora dostępna jest poprzez protokół komunikacyjny na panelu operatorskim lub w zdalnym nadrzędnym systemie zarządzania (SCADA).

W środowisku uruchomieniowym z przekształtnikiem wielopoziomowym powyższe funkcje nabierają szczególnie istotnego znaczenia dla poprawy bezpieczeństwa i efektywności prac programistycznych.

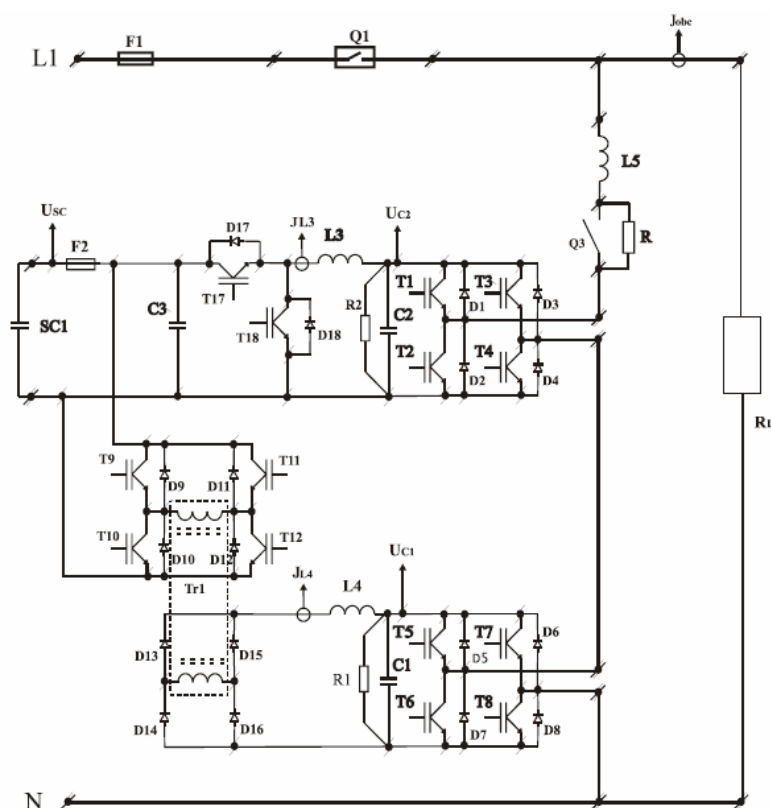
2.2. Asymetryczny przekształtnik wielopoziomowy

Wielopoziomowy falownik napięcia umożliwia uzyskiwanie przebiegu przemiennego generowanego napięcia o kształcie bliskim sinusoidalnemu (przebieg v_{aN}) już przy pracy blokowej co przedstawiono na rys.3. Komplikacja przekształtnika w tzw. układzie asymetrycznym o napięciach mostków składowych o różnych wartościach, wynika z konieczności zastosowania wzajemnie izolowanych źródeł napięcia stałego [10]. Przy współpracy przekształtnika z siecią o amplitudzie napięcia przekraczającej dopuszczalne napięcia klucze energoelektroniczne konieczne jest zapewnienie właściwego rozkładu napięć także w stanach nieustalonych. Uzyskuje się to poprzez dobór pojemności i właściwe obciążenie obwodów pośredniczących mostków składowych o napięciach stałych V_1 i V_2 .



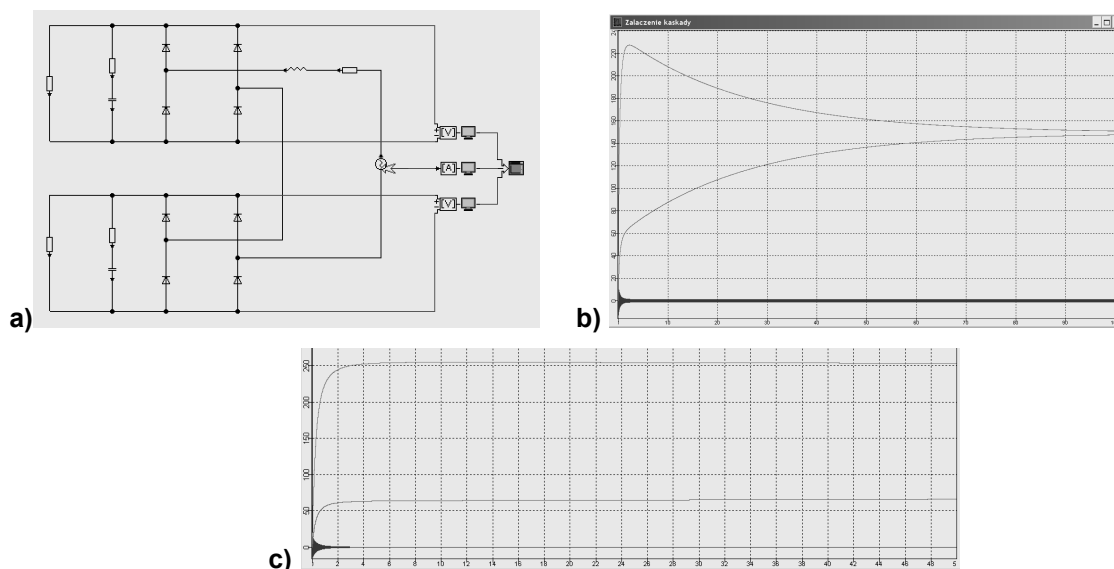
Rys. 3. Jedna faza asymetrycznego falownika kaskadowego oraz przebieg napięcia wyjściowego po zastosowaniu przykładowej modulacji napięcia V_1

Przykład realizacji jednej fazy falownika wielopoziomowego przedstawiono na rys.4. W opracowaniu [11] zawarto wyniki optymalizacji kątów załączania poszczególnych napięć składowych przekształtnika dla zapewnienia optymalnego składu widmowego napięcia wyjściowego (schodkowego) bez modulacji PWM. W układzie laboratoryjnym przekształtnik wielopoziomowy zostanie połączony ze źródłem zasilania sieciowego (z lokalnego punktu PCC) poprzez element obniżający moc zwarciovą systemu zasilania (nie uwidoczniony na rys.4). Pozwoli to także na modelowanie linii przesyłowej i zwiększy bezpieczeństwo prób.



Rys. 4. Schemat ideowy jednej fazy asymetrycznego falownika kaskadowego w układzie laboratoryjnym z pojedynczym zasobnikiem superkondensatorowym [11] (nie uwidoczniiono tranzystorów związanych z diodami D13-D16 obwodu ładowania SC1)

Wymagania dotyczące parametrów napięcia generowanego przez przekształtnik, wobec potrzeby minimalizacji strat łączeniowych i kosztu aktywnych podzespołów energoelektronicznych, predysponują układ wielopoziomowy do pracy przy napięciach wyjściowych przekraczających znacznie dopuszczalne napięcia znamionowe elementów półprzewodnikowych. Jednak wymóg zapewnienia kontrolowanego rozkładu napięć w układzie komplikuje procedury sterowania - konieczność zapewnienia bezpiecznego rozkładu napięć dotyczy także stanów nieustalonych związanych z rozruchem przekształtnika. Na rys.5 przedstawiono uproszczony model jednej fazy przekształtnika dla stanu rozruchu układu oraz wyniki symulacji. Układ składa się z szeregowo połączonych układów mostkowych typu H. Wyniki obrazują rozkład napięć na mostkach dla różnych stałych czasowych obciążeń poszczególnych obwodów.



Rys. 5. Ładowanie pojemności obwodów pośredniczących mostków przekształtnika:
 a) schemat obwodu jednej fazy kaskady, b) przebiegi napięć przy różnych stałych czasowych obwodów pośredniczących, c) przebiegi przy stałych czasowych równych

Z rysunku 5 wynika, że do zachowania bezpiecznego rozkładu napięcia na kluczach energoelektronicznych podczas uzupełniania energii w zasobniku wymagane jest obciążenie poszczególnych obwodów pośredniczących rezystancją zastępczą odwrotnie proporcjonalną do pojemności poszczególnych obwodów. W stanach dynamicznych źródła zasilania mostków przekształtnika powinny być tak sterowane, aby stosunek napięć pozostał nie zmieniony. W układzie z rysunku 4 realizowane to będzie za pomocą przekształtników z tranzystorami T9-T18 po wstępnym (jednorazowym) podładowaniu superkondensatora SC1 przez rezystor R.

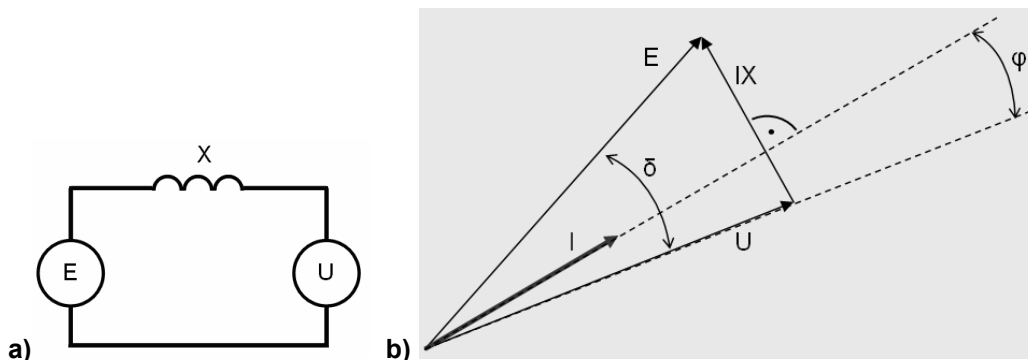
3. PERSPEKTYWY ZASTOSOWAŃ KOMPENSATORA

Celem zastosowania w sieci energetycznej magazynu energii wraz z układem energoelektronicznym, może być zarówno lokalne przeciwdziałanie skutkom zapadów napięcia, stabilizacja napięcia poprzez regulację mocy biernej, jak i zadania związane z zarządzaniem podsicią dystrybucyjną. W przedstawionym dalej opisie dotyczącym mocy biernej przyjęto założenie o liniowości i symetrii sieci i kompensatora, traktując go jako źródło przebiegów sinusoidalnych. Kompensator bocznikowy (shunt) staje się źródłem mocy zespolonej $\underline{S}=P+jQ$ „wstrzykiwanej” do węzła sieci energetycznej tzw.

STATCOM i stanowi jeden z wielu rodzajów aktywnych układów wspomaganie przesyłu energii liniami energetycznymi napięcia przemiennego [14].

3.1. Kompensator jako zabezpieczenie przed powstaniem lawiny napięcia

W prawidłowo pracującym systemie energetycznym napięcia przemiennego przepływu mocy czynnej i biernej muszą być zbilansowane. W niewielkim systemie zasilania z agregatem kogeneracyjnym, jako podstawową jednostką wytwórczą, generator synchroniczny jako główne źródło mocy w „mikrogridzie” może nie dysponować dostatecznie dużym zakresem regulacji mocy biernej [1]. Większość sieci dystrybucyjnych SN i nn charakteryzuje się występowaniem topologii radialnej, która nie nadaje się dobrze do obsługi dwukierunkowych przepływów energii pochodzących ze źródeł DER [7]. Wynika to z braku linii NN i WN, które dostarczają moc bierną w dużych systemach. W takiej sytuacji kompensator powinien stać się bocznikowym źródłem mocy biernej dla zapewnienia statycznej stabilności odbiorów. Wielkość napięcia generowanego przez kompensator (w trakcie pracy generacyjnej lub w czasie trwania zapadu napięcia) ma kluczowe znaczenie, gdyż wpływa na straty mocy biernej w sieci (m.in. straty na reaktancjach podłużnych linii przesyłowych i transformatorów). Maleją one w przybliżeniu z kwadratem napięcia na skutek zmniejszenia się prądów obciążenia. W efekcie występuje tu dodatnie sprzężenie zwrotne pomiędzy wielkością strat, a spadkami napięcia, które w szczególnie niekorzystnym przypadku może doprowadzić do katastrofального załamania się pracy systemu (tzw. lawina napięcia) [8].



Rys.6. Uproszczony model systemu przesyłu energii napięcia przemiennego:
a) schematy zastępcze systemu przesyłu energii, b) uproszczony wykres fazorowy napięć (I – wypadkowy prąd węzła U)

W uproszczonych schematach zastępczych systemu energetycznego symetryczne elementy sieci można modelować jako bezrezystancyjne czworniki typu π bez gałęzi poprzecznych. Na rysunku 6 przedstawiono połączenie dwóch systemów poprzez reaktancję X , którą należy utożsamiać z mocą zwarciovą systemu o hipotetycznej sile elektromotorycznej E (widzianą z zacisków systemu o napięciu U). W przypadku zadziałania odłącznika zmieniającego topologię sieci (rys.1a) zastępcza reaktancja X ulega skokowej zmianie do reaktancji X' - dochodzi do przejścia podsieci do pracy wyspowej przy nowych parametrach (E' , U' , δ' , φ'). Ustalony nowy punkt pracy systemu odpowiada innej, zastępczej sile elektromotorycznej $E' > 0$ gdy podsieć ta zawiera źródła (w niewielkim systemie źródłem wpływającym na wartość napięcia E' jest także kompensator).

Z wykresu fazorowego układu dwóch zastępczych źródeł napięcia sinusoidalnego \underline{E} i \underline{U} , połączonych poprzez reaktancję X czwornika modelującego taki układ (rys.6b) wynika, że moc czynna prądów przepływających oraz moc bierna dostarczana do węzła odbiorczego, mogą być opisane zależnościami [8]:

$$P_s = \frac{EU}{X} \sin \delta \qquad Q_s = \frac{EU}{X} \cos \delta - \frac{U^2}{X}$$

gdzie kąt δ (tzw. kąt mocy lub kąt obciążenia) jest kątem pomiędzy fazorami napięć \underline{E} i \underline{U} . Dla zachowania stabilności przesyłu kąt δ musi mieścić się w przedziale $(-90^\circ, 90^\circ)$. Wobec warunku $\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1$ z powyższych równań uzyskuje się tzw. charakterystykę wytwarzania $Q_s(U)$ określającą zależność mocy biernej oddawanej przez system elektroenergetyczny w punkcie odbioru od napięcia w tym punkcie, przy obciążeniu mocą czynną P_i :

$$Q_s = \sqrt{\left(\frac{EU}{X}\right)^2 - [P_i(U)]^2} - \frac{U^2}{X}$$

Oznaczenia wielkości występujących we wzorze: E – zastępcze (fikcyjne) źródło napięcia Thevenina SEE widziane z zacisków poprzez reaktancję X , U – stabilizowane napięcie sieci odbiorczej, $P_i(U)$ – moc czynna kompensowanych odbiorów jako funkcja napięcia na odbiorze (równa pobieranej z systemu mocy P_s).

Stabilność napięciowa systemu zasilania w punkcie odbioru jest zapewniona jeżeli system jest w stanie dostarczyć wymaganą moc bierną oraz

lokalne wzajemne położenie charakterystyk wytwarzania $Q_s(U)$ i poboru mocy biernej przez odbiorniki $Q_l(U)$ spełnia warunek [8]:

$$Q_s = Q_l \quad \text{oraz} \quad \frac{dQ_s}{dU} < \frac{dQ_l}{dU}$$

Wielkości dQ_s i dQ_l oznaczają przyrosty energii źródła i odbioru wynikające bezpośrednio z ich charakterystyk napięciowych. Moce generowane przez kompensator przyczyniają się do chwilowego przesunięcia charakterystyki odbioru złożonego przywracając równowagę systemu zasilania.

Badanie możliwych rozwiązań układu równań z funkcjami mocy P_s i Q_s (j.w.) w otoczeniu wybranego punktu pracy systemu, sprowadza się do badania m.in. wpływu napięcia U i kąta δ na wartość wyznacznika macierzy pochodnych cząstkowych tych funkcji [13]. Wyznacznik ten (Jakobian) wynosi zero w sytuacji osiągnięcia przez system maksymalnej (krytycznej) mocy przesyłowej co odpowiada warunkowi:

$$\cos \delta = \frac{E}{2U}$$

W pracy [13] przedstawiono matematyczne narzędzia do poszukiwania rozwiązania w takiej sytuacji, gdyż realizacja obliczeń i nastaw rozptyłów mocy, kluczowa dla zachowania stabilności systemu, w ogólności prowadzi do problemów ze zbieżnością całkowania numerycznego.

4. PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wybrane aspekty budowy wielopoziomowego kompensatora zapadów napięcia oraz sprzętowo-programową strukturę układu sterowania, która może pozwolić na realizację zasobnikowego podzespołu dla aktywnej sieci energetycznej. Problematyka budowy przekształtnika energoelektronicznego z magazynem energii, jako układu zdatnego do zastosowania w systemie energetycznym jest niezwykle szeroka i wymaga zawężenia wynikającego z potencjalnego obszaru aplikacji. Taki przekształtnik będzie przedmiotem szczegółowych badań z wytypowanymi modelami sieci i odbiorów oraz z uwzględnieniem ich nieliniowości i niesymetrii. Nieodzowne będzie stworzenie i weryfikacja algorytmów sterowania układem trójfazowym, opracowanie struktur danych, metod pomiarów wymienianej z systemem zewnętrznym energii elektrycznej w celu efektywnego zarządzania

zasobnikiem. W konsekwencji może pozwolić to na włączenie go do lokalnego bilansowania sieci, zapewnić wyższą jakość odbioru/dostawy energii użytkownikom, a nawet ich komercyjny udział w energetycznym rynku bilansującym.

LITERATURA

1. Machowski J.: Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, OWPW, Warszawa 2007.
2. Sánchez J. M.: SMART ELECTRICITY NETWORKS based on large integration of Renewable Sources and Distributed Generation, Kassel 2006.
3. Rodriguez J., Pontt J., Lezana P., Kouro S.: Tutorial on Multilevel Converters, PELINCEC2005.
4. <http://www.cpuc.ca.gov/puc/>.
5. Gibson, G. L.: Intelligent Software Agents – effective integration of Distributed Energy Resources into the California energy Marketplace. California Energy Commission, PIER Energy-Related Research, 2007.
6. Skytte K., Ropenus S.: Assessment and Recommendations Overcoming in Short-Term Grid System Regulatory and other Barriers to Distributed Generation, Research Project supported by the European Commission, 2005.
7. Opracowanie OG/834/ZNB-174/2007, Instytut Elektrotechniki w Gdańsku.
8. Poradnik Inżyniera – Elektryka, Elektroenergetyka, WNT, Warszawa 1975.
9. http://www.foresterpress.com/de_0311_ieee.html.
10. Dispower – Distributed Generation with High Penetration Of Renewable Energy Sources, Final Public Report – Editors: Thomas Degner, Jurgen Schmidt, Philipp Strauss, Kassel 2006.
11. http://www.elektrownie-wiatrowe.org.pl/art_dunski_sb.htm.
12. Bing J. M.: NPEG – Network Protector Enabled Generation, CADER 2008.
13. Mondzik A.: Trójfazowy kompensator prądów biernych typu statcom sterowany w układzie d-q – wyniki badań laboratoryjnych, SENE2007.
14. Penczek A.: Trójfazowy prostownik o jednostkowym współczynniku mocy umożliwiającą zwrot energii do sieci zasilającej, SENE2007.
15. Lasseter R. H.: Microgrids and Distributed Generation, Journal of Energy Engineering, American Society of Civil Engineers, Sept. 2007.
16. <http://jade.tilab.com/>.
17. <http://www.wnp.pl/>.
18. Instytut Elektrotechniki, Raport Roczny z realizacji projektu „Filtr aktywny (kompensator) zapadów i krótkotrwałych zaników napięcia sieci energetycznej z magazynem energii w postaci baterii wysokonapięciowych superkondensatorów składanych”, COST/255/2006.

Rękopis dostarczono dnia 3.12.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Marian PASKO

MULTILEVEL VOLTAGE DIP COMPENSATOR WITH
SUPERCAPACITOR AS AN ENERGY STORAGE –
SELECTED CONSTRUCTION ASPECTS

Piotr BOGUSŁAWSKI, Eugeniusz ŁOWIEC

ABSTRACT *A construction of prototyped one phase supercapacitor based voltage dip compensator is presented and selected problems of evolution to asymmetric multilevel topology are shortly described. Such complex device was treated as distributed renewable energy source located in future active supply network and a kind of applications and potentially suitable software tool for its supervising are presented.*