

## MODELE KOMPENSATORÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH DO ANALIZ PRACY SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO – REFERAT KONFERENCYJNY

Robert KOWALAK<sup>1</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Elektroenergetyki  
tel: (58) 347 18 27 fax: (58) 347 18 98 e-mail: r.kowalak@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje wybrane modele kompensatorów energoelektronicznych wykorzystanych do analizy ich pracy w systemie elektroenergetycznym. Wykazano wady, jak i zalety modeli, wraz z zaznaczeniem zakresu ich przydatności do modelowania określonych zjawisk.

**Słowa kluczowe:** energoelektroniczne kompensatory bocznikowe, SVC, STATCOM.

### 1. WPROWADZENIE

W systemach elektroenergetycznych pracujących na świecie stosowane są różnego rodzaju układy, których zadaniem jest prowadzenie procesów regulacji. Najnowszymi w tej dziedzinie są urządzenia energoelektroniczne dużej mocy określane mianem FACTS (ang. *Flexible Alternating Current Transmission Systems*). Duże znaczenie w obrębie tych urządzeń mają energoelektroniczne kompensatory bocznikowe. Ich podstawowym zadaniem w systemach jest „dbanie” o jakość napięcia zasilającego.

W celu oceny oddziaływania tych układów na system konieczne są badania, które z racji dużej mocy tych urządzeń, jak również ich znaczącego kosztu, prowadzone są w postaci symulacji komputerowych.

W niniejszym referacie zaprezentowano modele energoelektronicznych kompensatorów bocznikowych, które zostały opracowane i wykorzystane w badaniach symulacyjnych pracy systemu elektroenergetycznego. Modele te opracowane zostały pod kątem zastosowania ich w programach symulacyjnych PLANS oraz DIGSILENT PowerFactory.

### 2. KOMPENSATORY BOCZNIKOWE FACTS

Kompensatory energoelektroniczne dzielone są na dwa podstawowe typy: układy SVC (ang. *Static VAR Compensator*) oraz STATCOM (ang. *Static Compensator*), oraz hybrydę obu tych rozwiązań, której struktura przypomina SVC z tym, że moduł TCR został w niej zastąpiony układem STATCOM, określaną jako SVC na bazie STATCOM.

Kompensatory SVC budowane są z modułów typu: TSC (ang. *Thyristor Switched Capacitor*) – kondensator załączany tyrystorowo, TSR (ang. *Thyristor Switched Reac-*

*tor*) – dławik załączany tyrystorowo, TCR (ang. *Thyristor Controlled Reactor*) – dławik o tyrystorowo regulowanej indukcyjności, oraz FC (ang. *Fixed Capacitors*) stałe baterie kondensatorów, do których często zalicza się też filtry wyższych harmonicznych.

Nazwa kompensatora SVC uzależniona jest od zastosowanych modułów i własności układu. W praktyce można więc spotkać układy SVC typu: TSC, TSR, TSR-TSC, TCR-FC oraz TCR-TSC-FC.

W zakresie układów STATCOM wyróżniamy dwie konstrukcje. Najbardziej rozpowszechnioną jest oparta o przekształtnik VSI (ang. *Voltage Source Inverter*), czyli przetwornicę napięcia. Natomiast układów STATCOM zbudowanych w oparciu o przetwornicę prądu CSI (ang. *Current Source Inverter*) w systemie elektroenergetycznym na razie nie zastosowano.

Szczegółowo układy kompensatorów bocznikowych FACTS zostały przedstawione w [1].

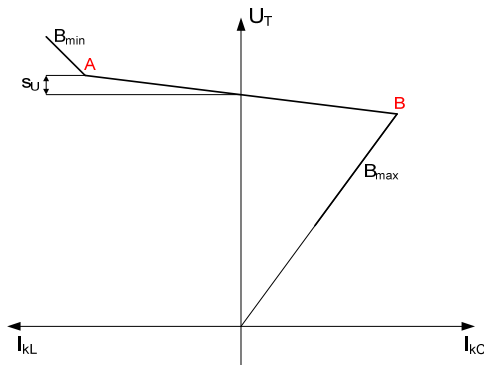
### 3. MODELE STATYCZNE

Przy tworzeniu modeli statycznych istotna jest specyfika tych układów w stanach ustalonych. W zakresie regulacyjnym oba podstawowe typy kompensatorów, prowadzące regulację w sposób ciągły, zachowują się tak samo. Zachowanie tych układów poza zakresem regulacji jest jednak różne. Wynika to z tego, że moc bierna układu SVC jest zależna od kwadratu napięcia zasilającego, natomiast moc bierna STATCOM zależy od wartości napięcia. Wymaga to różnego podejścia do modelowania ich pracy poza określonym dla nich zakresem regulacji.

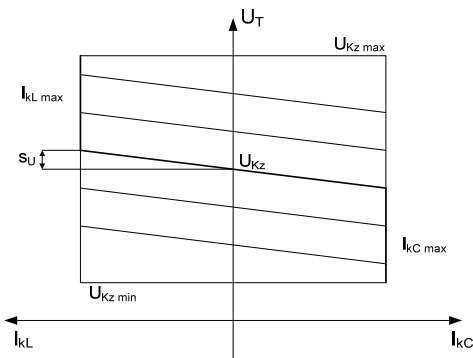
Przy tworzeniu modelu ważne jest prawidłowe odzwierciedlenie charakterystyki danego kompensatora. W zależności od potrzeb, model może odzwierciedlać całą charakterystykę lub tylko pewne jej części. Przykładową charakterystykę statyczną układu SVC przedstawiono na rysunku 1, a STATCOM na rysunku 2.

Jednym ze sposobów zamodelowania kompensatora jest odzwierciedlenie go przy pomocy wyidealizowanego modelu generatora z przyłączoną do niego szeregowo reaktancją indukcyjną [2, 3], której podstawowym zadaniem jest odzwierciedlenie statyzmu kompensatora. Wprowadzenie

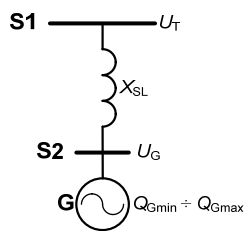
odpowiednich ograniczeń w zakresie generacji mocy biernej do generatora pozwala na oddanie dostępnego zakresu mocy biernej, a przyłączona reaktancja umożliwi zamodelowanie statyzmu kompensatora. Taki model przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 1. Charakterystyka statyczna układu SVC:  $s_U$  – statyzm kompensatora,  $U_T$  – napięcie w punkcie przyłączenia,  $I_k$  – prąd kompensatora (L – indukcyjny, C – pojemnościowy)



Rys. 2. Charakterystyka statyczna urządzenia STATCOM:  $U_{Kzmax}$ ,  $U_{Kzmin}$  – górne i dolne ograniczenie napięciowe,  $I_{kLmax}$ ,  $I_{kCmax}$  – ograniczenie prądowe związane z prądem członu indukcyjnego i pojemnościowego,  $U_{Kz}$  – napięcie zadane



Rys. 3. Schemat modelu kompensatora – model generatorowy z reaktancją:  $S_1$  – szyna przyłączeniowa kompensatora do systemu,  $X_{SL}$  – reaktancja modelująca statyzm,  $S_2$  – szyna generatora,  $G$  – generator,  $U_G$  – napięcie generatora

Model pozwala na odzwierciedlenie poprawnej pracy kompensatora zarówno SVC, jak i STATCOM, ale tylko w zakresie regulacyjnym. Do modelu należy wprowadzić takie parametry, jak zakres dopuszczalnych zmian mocy biernej generatora, napięcie zadane generatora i wartość reaktancji szeregowej  $X_{SL}$ . Wartości tych parametrów wyznaczone są w oparciu o parametry modelowanego kompensatora według zależności

$$Q_{Gmin} = Q_{Kmin} \quad (1)$$

$$Q_{Gmax} = Q_{Kmax} \quad (2)$$

gdzie:  $Q_{Kmin}$  – moc członu indukcyjnego kompensatora (minimalna),  $Q_{Kmax}$  – moc członu pojemnościowego kompensatora (maksymalna).

$$U_G = U_{Kz} \quad (3)$$

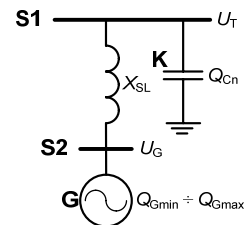
gdzie:  $U_{Kz}$  – napięcie zadane kompensatora

$$X_{SL} = \frac{s_U \cdot U_{Kn}^2}{S_{Kn}} \quad (4)$$

gdzie:  $U_{Kn}$  – napięcie znamionowe kompensatora,  $S_{Kn}$  – moc znamionowa kompensatora,  $s_U$  – statyzm kompensatora wyrażony w jednostkach względnych.

Model ten jest prosty i łatwy w zastosowaniu, ale może być wykorzystany jedynie w tych badaniach symulacyjnych, w których odzwierciedlane kompensatory nie wykraczają w czasie pracy poza określony dla nich zakres regulacji. Poza nim będzie bowiem utrzymywał stałą generację lub pobór mocy biernej (w zależności od tego, które z ograniczeń zostało przekroczone) tak, jak to robi generator. Model ten można zmodyfikować, co zwiększa zakres zastosowania, ale tylko w odniesieniu do zamodelowania układu SVC.

Pierwsza z modyfikacji pozwala na dobre zamodelowanie kompensatora SVC w zakresie części regulacyjnej, jak również poza zakresem regulacji przy niskich wartościach napięć, a więc gdy kompensator pracuje w trybie pojemnościowym. Modyfikacja polega na włączeniu w strukturę modelu określonej pojemności, tak jak obrazuje to rysunek 4.



Rys. 4. Schemat modelu kompensatora – model generatorowy z reaktancją i baterią kondensatorów:  $S_1$  – szyna przyłączeniowa kompensatora do systemu,  $X_{SL}$  – reaktancja modelująca statyzm,  $S_2$  – szyna generatora,  $G$  – generator,  $K$  – bateria kondensatorów,  $C_n$  – moc znamionowa kondensatorów,  $U_G$  – napięcie generatora

Wprowadzona zmiana wymusza nieco inny sposób określenia niektórych parametrów modelu, które wyznaczamy w oparciu o zależności

$$Q_{Gmin} = Q_{Kmin} - Q_{Kmax} \quad (5)$$

$$Q_{Gmax} = 0 \quad (6)$$

$$U_G = \frac{U_{Kz} \cdot S_{Kn}}{S_{Kn} + s_U \cdot Q_{Kmax}} \quad (7)$$

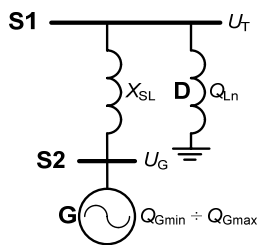
$$X_{SL} = \frac{S_U \cdot U_{Kn}^2}{S_{Kn} \cdot (1 + S_U)} \quad (8)$$

Wartość wprowadzonej pojemności należy tak dobrać, aby osiągnięta przez nią moc bierna znamionowa miała wartość równą mocy biernej członu pojemnościowego kompensatora

$$Q_{Cn} = Q_{Kmax} \quad (28)$$

Ten rodzaj modelu SVC może być wykorzystany do badań zachowania systemu z kompensatorem w stanach silnych obciążeń, jak również przy modelowaniu awarii napięciowych charakteryzujących się niskimi wartościami napięć (np. zjawisko lawiny napięcia).

Druga z modyfikacji pozwala na dobre zamodelowanie kompensatora SVC w zakresie częstotliwości regulacyjnej i poza zakresem regulacji przy wysokich wartościach napięć, a więc gdy kompensator pracuje w trybie indukcyjnym. Modyfikacja polega tu na włączeniu w strukturę modelu określonej indukcyjności, tak jak obrazuje to rysunek 5.



Rys. 5. Schemat modelu kompensatora – model generatorowy z reaktancją i dławikiem: S<sub>1</sub> – szyna przyłączeniowa kompensatora do systemu, X<sub>SL</sub> – reaktancja modelująca statyzm, S<sub>2</sub> – szyna generatora, G – generator, D – dławik, Q<sub>Ln</sub> – moc znamionowa dławika, U<sub>G</sub> – napięcie generatora

Podobnie, jak w poprzednim modelu, także tu wprowadzona zmiana wymusza inny sposób określania niektórych parametrów modelu, zgodny z zależnościami

$$Q_{Gmin} = 0 \quad (9)$$

$$Q_{Gmax} = Q_{Kmax} - Q_{Kmin} \quad (10)$$

$$U_G = \frac{U_{Kz} \cdot S_{Kn}}{S_{Kn} + S_U \cdot Q_{Kmin}} \quad (11)$$

Wartość reaktancji X<sub>SL</sub> wyznaczana jest zgodnie ze wzorem 8. Wartość wprowadzonej indukcyjności należy tak dobrać, aby osiągnięta przez nią moc bierna znamionowa miała wartość równą mocy biernej członu indukcyjnego kompensatora

$$Q_{Ln} = Q_{Kmin} \quad (12)$$

Ten rodzaj modelu może być wykorzystany do badań zachowania systemu w stanach słabego obciążenia (np. dolina nocna).

Prezentowane modele można wykorzystać w badaniach dotyczących zastosowania kompensatora STATCOM, ale

trzeba pamiętać, że poprawnie zachowują się one tylko w zakresie regulacji tego kompensatora.

## 4. MODELE DYNAMICZNE

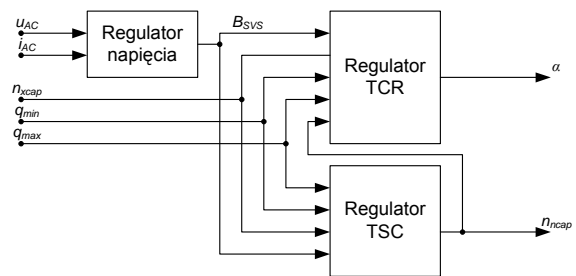
### 4.1. Model układu SVC

Kompleksowy model dynamiczny układu SVC składa się z modelu transformatora WN/SN, szyn SN do których przyłączone są moduły TSC, TSR, TCR i FC. Elementem regulującym pracę całego układu jest regulator SVC.

Duża część programów symulacyjnych zawiera gotowe wbudowane modele transformatorów, czy filtrów, które w takim modelu można wykorzystać. Należy tylko prawidłowo dobrać parametry tych elementów do modelowanego układu SVC.

Elementy TCR, TSC i TSR wymagają uwzględnienia elementów półprzewodnikowych. Dostępne modele dynamiczne półprzewodników w programach symulacyjnych z reguły są wystarczające i nie trzeba opracowywać własnych, pozostaje tylko dobór ich parametrów.

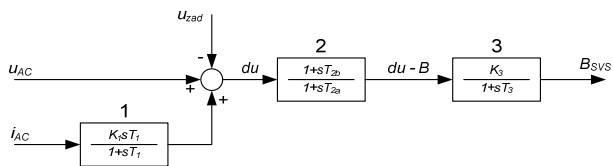
Sercem modelu jest regulator układu SVC. Ponieważ za standardowy, z punktu widzenia sieci przesyłowej, uważa się układ SVC zawierający w swojej strukturze elementy typu TCR i TSC, to regulator takiego układu zaprezentowano na rysunku 6 i zostanie on dalej omówiony.



Rys. 6. Regulator układu SVC typu TCR-TSC

Do regulatora wprowadzane są sygnały wartości względnej napięcia w punkcie przyłączenia kompensatora ( $u_{AC}$ ), wartości względnej prądu kompensatora ( $i_{AC}$ ) oraz sygnały informujące o liczbie zainstalowanych członów TSC ( $n_{xcap}$ ), mocy pojedynczego członu TSC ( $q_{min}$ ) i mocy członu TCR ( $q_{max}$ ). Sygnałami wyjściowymi jest kąt załączenia tyrystorów TCR ( $\alpha$ ) oraz liczba aktualnie załączonych członów TSC ( $n_{ncap}$ ). Regulator składa się z trzech elementów: regulatora napięcia, regulatora TCR i regulatora TSC. Struktura regulatora napięcia w układzie SVC została zaprezentowana na rysunku 7.

W strukturze regulatora napięcia widoczne są trzy bloki. Pierwszy z nich (1) jest członem korekcyjnym od prądu kompensatora. Drugi (2) to człon korekcyjny napięcia, a trzeci (3) to człon inercyjny. Wzmocnienie członu inercyjnego odzwierciedla statyzm układu. Sygnałem wyjściowym z regulatora napięcia jest wartość susceptancji układu SVC ( $B_{SVs}$ ) wyrażonej w jednostkach względnych, jaką powinien osiągnąć kompensator. Poprzez porównanie względnej wartości napięcia mierzonego z wartością zadaną regulator określa, jaką wartość susceptancji powinien mieć kompensator.



Rys. 7. Regulator napięcia układu SVC

Zadaniem regulatora TCR jest takie wysterowanie kąta zapłonu tyrystorów w dławiku TCR, aby osiągnąć wymaganą względną wartość susceptancji kompensatora, z uwzględnieniem liczby załączonych sekcji TSC.

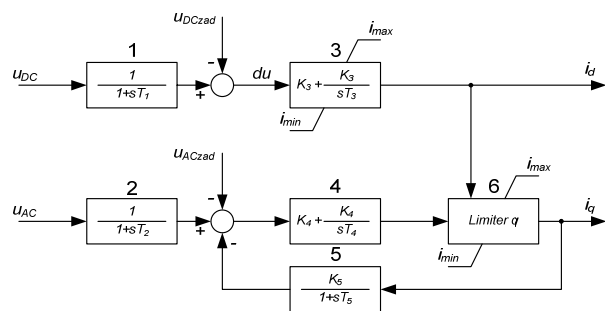
Zadaniem regulatora TSC jest kontrola i korekta liczby załączonych baterii TSC w zależności od wymaganej wartości susceptancji  $B_{SVC}$  kompensatora.

#### 4.2. Model układu STATCOM

Kompleksowy model układu STATCOM składa się z modeli takich elementów, jak transformator WN/SN, szyny SN, przekształtnik PWM, szyny DC oraz bateria kondensatorów do nich przyłączona.

Podobnie, jak w modelu SVC, także tutaj można do kompleksowego modelu kompensatora wprowadzić dostępne w programie modele elementów składowych.

W układzie STATCOM sterujemy tylko przekształtnikiem, który obciążony jest po stronie napięcia wyprostowanego pojemnością. Wartość jej dobierana jest do modelowanego układu STATCOM. Strukturę regulatora układu prezentuje rysunek 8.



Rys. 8. Regulator układu STATCOM

Do układu sterowania wprowadzane są sygnały pomiarowe napięcia w punkcie przyłączenia do sieci AC ( $u_{AC}$ ) oraz napięcia w obwodzie DC ( $u_{DC}$ ) wyrażone w jednostkach względnych. W regulatorze zadawane są wartości napięć, jakie układ ma utrzymywać w obu obwodach. Sygnałami wyjściowymi regulatora są wartości prądu w osiach d ( $i_d$ ) i q

( $i_q$ ) wyrażone w jednostkach względnych, służące do odpowiedniego wysterowania przekształtnika.

Bloki regulatora 1 i 2 odzwierciedlają opóźnienie sygnałów w torach pomiarowych napięć. Kolejne bloki pełnią rolę regulatorów napięć, przy czym blok 3 w obwodzie DC, a 4 w AC. Sygnał wyjściowy bloku 3 w postaci składowej prądu przekształtnika w osi d jest tak ograniczany, aby prąd nie przekroczył wartości dopuszczalnej dla przekształtnika. Blok 5 znajduje się w pętli sprzężenia zwrotnego toru regulacji napięcia AC i pozwala na wprowadzenie statyzmu do modelu, a ostatni z bloków (6) pełni rolę ogranicznika składowej prądu przekształtnika w osi q w zależności od wartości składowej prądu w osi d i dopuszczalnej wartości prądu przekształtnika.

#### 5. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane modele statyczne pozwalają na zadowalające oddanie pracy kompensatorów w systemie, przy czym dokładniej odwzorowują zachowanie kompensatorów typu SVC. Ich struktura i obsługa są proste, przez co mogą być zastosowane w wielu programach wykonujących obliczenia rozplływowe.

Modele dynamiczne pozwalają na modelowanie kompensatorów o różnych parametrach. Użytkownik sam może dobrać elementy składowe i moc urządzenia, które chce zamodelować, a także wpływać na jego dynamikę poprzez odpowiedni dobór parametrów

Opisane tu skrótowo modele zostały wykorzystane w badaniach dotyczących analiz pracy sieci elektroenergetycznej prowadzonych w programach PLANS oraz DIGSI-LENT PowerFactory.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

1. Kowalak R., Małkowski R.: Energoelektroniczne kompensatory bocznikowe jako sterowane źródła mocy biernej, Acta Energetica, nr 01/2011.
2. Mahdad B., Bouktir R., Srairi K.: Strategy of Location and Control of FACTS Devices for Enhancing Power Quality, May 16-19, Benalmádena (Málaga), Spain, IEEE MELECON 2006.
3. Nabae A., Yamaguchi M.: Supression of Flicker in an Arc-Furnace Supply System by an Active Capacitance – A Novel Voltage Stabilizer in Power Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, No. 1, January/February 1995.

### MODELS OF POWER ELECTRONIC COMPENSATORS FOR THE ANALYSIS OF POWER SYSTEM OPERATION – CONFERENCE PAPER

**Key-words:** power electronic compensators, SVC, STATCOM

This article presents selected models of power electronic compensators applied for the analysis of their operation in power system. Advantages and disadvantages of models have been presented with an indication of their usefulness for modeling of specific phenomena.