

## DYNAMICZNE STABILIZATORY NAPIĘCIA

### Dynamic Voltage Stabilizers

Ryszard KOZIOŁ, Zbigniew HANZELKA, Stanisław PIRÓG

Akademia Górniczo-Hutnicza

**Streszczenie:** Stabilizacja napięcia na zaciskach wyróżnionego odbiornika lub grupy odbiorników przemysłowych — to jedna z podstawowych funkcji urządzeń zwanych ogólnie stabilizatorami (niekiedy również kompensatorami). Jeżeli za początek historycznej drogi rozwoju nadążnych, przemysłowych stabilizatorów napięcia przyjąć maszynę synchroniczną, to można stwierdzić, że współczesna energoelektronika, za sprawą szybkiego rozwoju technologii produkcji elementów półprzewodnikowych dużej mocy, oferuje bardzo liczną rodzinę różnych rozwiązań technicznych pełniących między innymi zadanie stabilizacji. W artykule omówiono zasady działania oraz podstawowe cechy konstrukcyjne różnych, stosowanych obecnie kompensatorów dynamicznych zmian napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP). Przedstawiono również rozwiązania techniczne proponowane w ramach systemu FACTS, tworzącego nową jakość współczesnej elektroenergetyki.

**Summary:** Voltage stabilisation at the input terminals of a selected load or group of industrial loads is one of the baseline functions of devices which are generally called stabilizers (sometimes also compensators). If we assume that synchronous machines were the starting point of the historical path of developments in follow-up industrial voltage stabilizers, it can be considered that modern power engineering electronics, thanks to the fast evolution of high power semiconductor elements production technology, currently offers a wide range of technical solutions also performing stabilisation. The paper describes the operation and the basic construction characteristics of various dynamic voltage compensators in PCC, that are currently used. Technical solutions proposed within the FACTS system, being the origin of a new quality in modern electrical power engineering have also been presented.

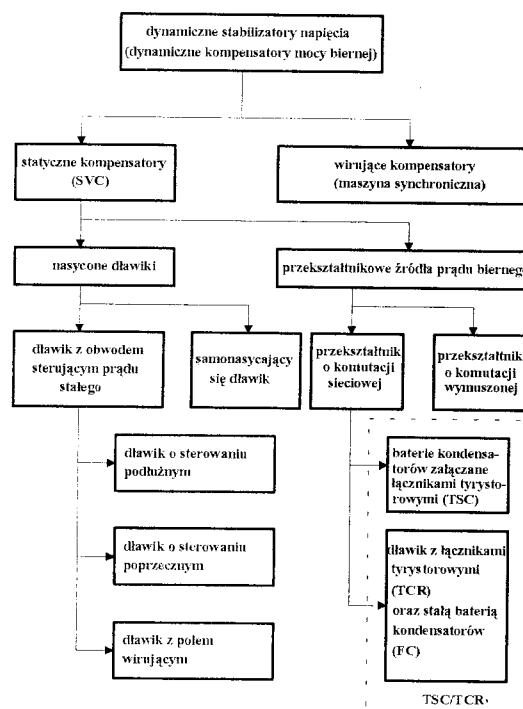
### 1. WSTĘP

Dynamiczne stabilizatory są jednym z technicznie możliwych sposobów eliminacji zmian napięcia lub redukcji ich wartości. Skuteczność ich działania zależy głównie od mocy znamionowej oraz amplitudy zmian napięcia (przy założeniu okresowości ich występowania). Powodując przepływ prądu/mocy biernej podstawowej harmonicznej wywołują one spadki napięcia na impedancjach sieci zasilającej. W zależności od charakteru prądu biernego (indukcyjny lub pojemnościowy) powoduje to wzrost lub obniżenie wartości skutecznej napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP).

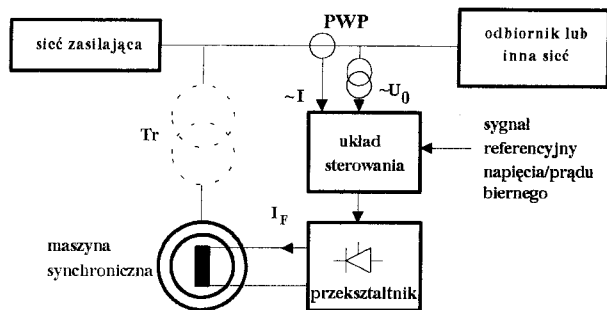
Rysunek 1 przedstawia klasyfikację różnych rozwiązań dynamicznych stabilizatorów napięcia. Są to głównie układy trójfazowe o znacznej mocy znamionowej, przeznaczone do stabilizacji napięcia w punkcie węzłowym sieci rozdzielczej lub stabilizacji napięcia wyróżnionego odbiornika/grupy odbiorników w PWP. Ponieważ układy te bardzo często pełnią funkcję dynamicznych kompensatorów mocy/prądu biernego podstawowej harmonicznej, dlatego pojęcia: stabilizator i kompensator używane będą zamiennie.

### 2. MASZYNA SYNCHRONICZNA (WIRUJĄCY KOMPENSATOR)

Maszyny synchroniczne są tradycyjnym źródłem regulowanej w sposób ciągły mocy biernej podstawowej harmonicznej



Rys. 1. Klasyfikacja dynamicznych stabilizatorów napięcia



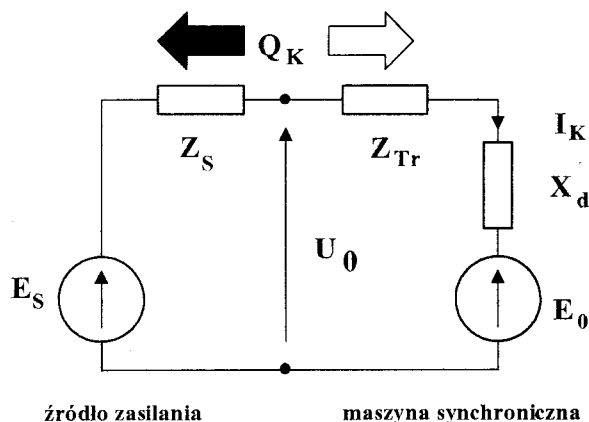
Rys. 2. Schemat układu stabilizacji napięcia z zastosowaniem maszyny synchronicznej

(indukcyjnej lub pojemnościowej). Mogą być równocześnie źródłem energii mechanicznej w przypadku pracy maszyny nie tylko jako kompensator, lecz również jako napęd. Przykładowy schemat instalacji, w której wykorzystano maszynę synchroniczną do stabilizacji napięcia, przedstawia rysunek 2.

W ustalonym stanie pracy kompensator synchroniczny można przedstawić za pomocą uproszczonego jednofazowego schematu, jak na rysunku 3, gdzie:

- $E_0, X_d$  — SEM i zastępcza reaktancja maszyny,
- $E_S, Z_S$  — napięcie sieci zasilającej przy odłączonym odbiorniku oraz impedancja zastępcza sieci,
- $Z_{Tr}$  — impedancja zastępcza transformatora,
- $Q_K$  — moc bierna maszyny (o zmiennej wartości i znaku).

Wszystkie wielkości dotyczą podstawowej harmonicznej.

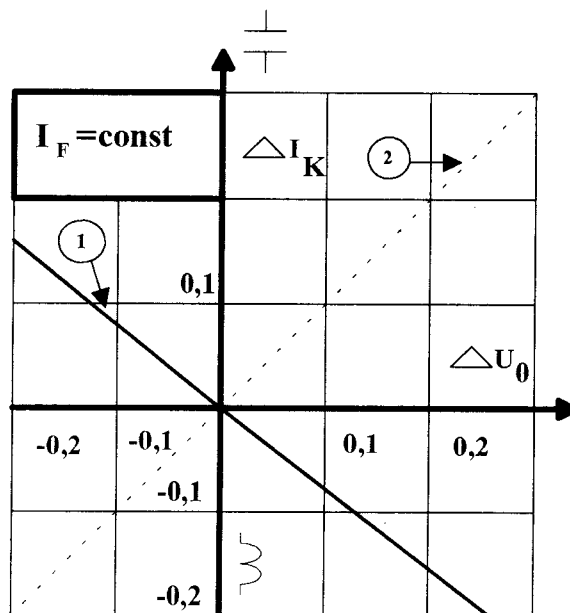


Rys. 3. Jednofazowy schemat zastępczy sieci zasilającej i kompensatora synchronicznego

### 2.1. Praca maszyny synchronicznej ze stałym prądem wzbudzenia ( $I_F = \text{const}$ )

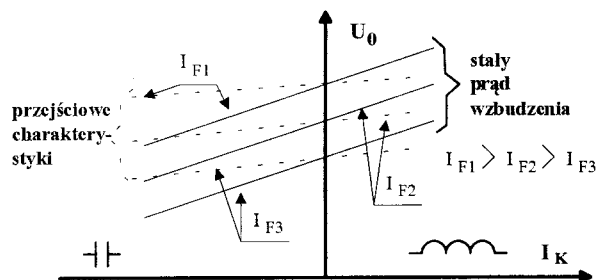
Zmianę prądu kompensatora ( $\Delta I_K$  w jednostkach względnych) w funkcji zmiany jego napięcia ( $\Delta U_0$  również w jednostkach względnych) przedstawia rysunek 4 (dla maszyny przewzbudzonej). Przyrosty napięcia i prądu odniesiono do wartości znamionowych. Dla porównania, na rysunku 4 przedstawiono linią przerywaną zależność zmiany prądu od zmiany napięcia dla stałej baterii kondensatorów.

W przypadku, gdy napięcia zasilające  $U_0$  maleje, wzrasta wartość pojemnościowego prądu maszyny; kompensator synchroniczny wpływa zatem stabilizująco na wartość napięcia, nawet gdy prąd wzbudzenia nie podlega regulacji.



Rys. 4. Przykładowa zmiana prądu biernego kompensatora synchronicznego (1) i baterii kondensatorów (2) w funkcji zmiany napięcia zasilającego

Rysunek 5 przedstawia rodzinę statycznych charakterystyk —  $U_0 = f(I_K)$  — dla których przyjęto jako parametr wartość prądu wzbudzenia. Nachylenie charakterystyk jest proporcjonalne do ( $X_d + Z_{Tr}$ ). Stopień redukcji szybkich zmian napięcia zależy od reaktancji synchronicznej kompensatora w stanach dynamicznych. Reaktancja  $X_d$  maleje wówczas do wartości  $X'_d < X_d$ , gdzie  $X'_d$  jest reaktancją przejściową maszyny. W efekcie tego, nawet bez układu regulacji prądu wzbudzenia, nachylenie charakterystyki dynamicznej ( $U_0 = f(I_K)$ ) będzie mniejsze, a tym samym większa będzie zdolność maszyny do redukcji amplitudy zmian napięcia.

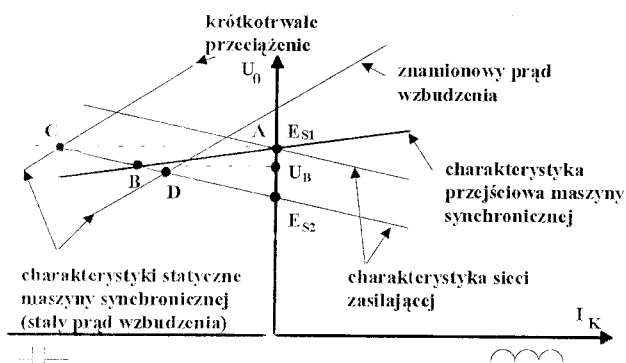


Rys. 5. Styczne i dynamiczne charakterystyki —  $U_0 = f(I_K)$  — kompensatora synchronicznego

Stosowanie maszyny synchronicznej bez układów regulacji prądu wzbudzenia jest niecelowe. Do osiągnięcia dopuszczalnego normami poziomu zmian napięcia niezbędna jest maszyna o znamionowej mocy wielokrotnie przekraczającej moc odbiornika, którego napięcie podlega stabilizacji. Ten fakt wraz z wymaganiami dobrej dynamiki procesu stabilizacji uzasadnia potrzebę pracy maszyny synchronicznej w zamkniętym układzie stabilizacji napięcia (lub kompensacji prądu biernego). Obwód wzbudzenia zasilany jest wówczas z regulowanego, nawrotnego źródła zasilania. Napięcie zasilające obwód wzbudzenia, o odpowiednio dużej wartości w relacji do napięcia znamionowego, pozwala uzyskać dużą szybkość zmian prądu biernego maszyny synchronicznej.

## 2.2 Praca maszyny synchronicznej z regulowanym prądem wzbudzenia ( $I_F \neq \text{const}$ )

Na rysunku 6 przedstawiono trajektorię punktu pracy kompensatora synchronicznego przy skokowej zmianie napięcia sieci zasilającej z  $E_{S1}$  na  $E_{S2}$  i regulacji prądu wzbudzenia.



Rys. 6. Reakcja kompensatora synchronicznego na skokową zmianę napięcia (praca maszyny w zamkniętym układzie regulacji)

Zakładając przykładowo, że punkt A jest początkowym punktem pracy, po skokowej zmianie napięcia zasilającego przemieszcza się on wzdłuż odcinka AB. Nachylenie tej trajektorii będzie mniejsze niż charakterystyki statycznej ze względu na obecność prądów przejściowych. Ich wpływ zanika podczas przemieszczenia się punktu pracy. Napięcie  $U_B$  jest większe od  $E_{S2}$ , co ilustruje zdolność kompensatora do szybkiego wywołania przepływu prądu biernego niezbędnego dla celów stabilizacji. Kompensator pracuje w stanie przewzbudzenia i napięcie  $U_B < E_{S1}$ . Dla zachowania początkowej wartości napięcia regulator zwiększa prąd wzbudzenia, powodując przejście kompensatora do pracy w punkcie C. Jeżeli oznacza to przekroczenie parametrów znamionowych kompensatora, wówczas, po dopuszczalnym czasie przeciążenia, prąd wzbudzenia zmaleje do wartości znamionowej ( $I_{FN}$ ), czemu odpowiada punkt D na charakterystyce. Tak więc przy dłuższej trwającym załamaniu napięcia kompensator synchroniczny będzie redukował, a nie eliminował jego wartość.

## 2.3. Szybkość zmian mocy biernej

W przeciwieństwie do kompensatorów statycznych, w przypadku maszyny synchronicznej nie należy przyjmować za kryterium jakości działania (w stanach dynamicznych) czasu reakcji, lecz szybkość zmian prądu/mocy biernej. Wielkość ta jest również miarą szybkości korygowania przez kompensator zmian napięcia w PWP. W przybliżeniu jest ona równa szybkości zmian prądu wzbudzenia i jest większa przy odwzbudzeniu niż przy dowzbudzeniu maszyn. Zależy od wielu różnych czynników, np. od cech konstrukcyjnych maszyny, dopuszczalnej maksymalnej wartości napięcia wzbudzenia, przyjętego współczynnika napięciowego forsowania itp. Dla silników synchronicznych szybkość ta nie przekracza na ogół 150 MVAR/s. Według danych niemieckich [6, 13] optymalnie zaprojektowany kompensator synchroniczny ze wzbudzeniem tyrystorowym i silnym napięciowym forsowaniem wzbudzenia jest zdolny do wywołania zmian mocy biernej zachodzących z szybkością  $S_N/50$  [MVAR/ms], gdzie  $S_N$  jest mocą znamionową kompensatora.

W krajowym przemyśle uruchomiono wiele instalacji, w których maszyna synchroniczna prócz funkcji napędu pełni również funkcję kompensatora mocy biernej [18].

## 3. STATYCZNE KOMPENSATORY (SVC)

W większości przypadków (z wyłączeniem przekształtnikowych źródeł prądu biernego) statyczne kompensatory wykorzystują elementy biernie pojemnościowe i/lub indukcyjne załączane, sterowane fazowo lub o zmiennym stopniu nasycenia rdzenia. Wywołują one przepływ, wymaganego ze względów stabilizacyjnych, prądu biernego w sposób dyskretny lub częściej w sposób ciągły. W wielu publikowanych pracach, na podstawie udokumentowanych doświadczeń eksploatacyjnych formułowany jest wniosek, że są one obecnie najbardziej korzystnym — z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia — sposobem poprawy warunków dostawy energii elektrycznej.

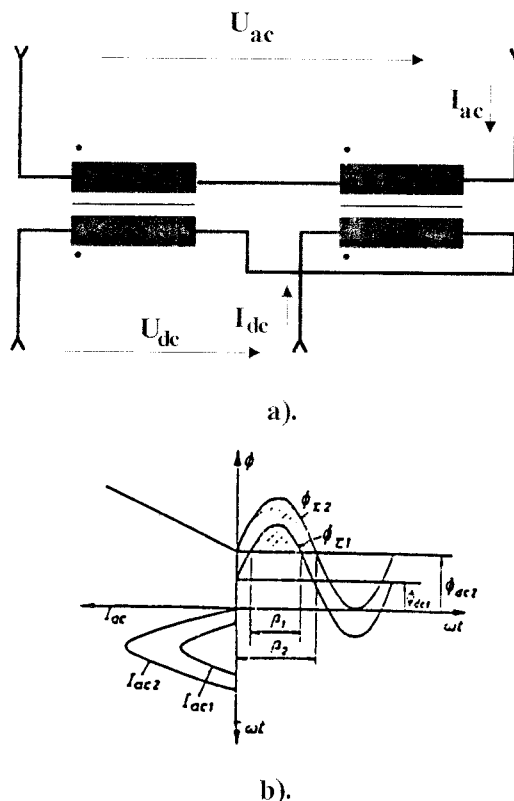
### 3.1. Układy z nasyconymi dławikami

Skonstruowano wiele urządzeń przeznaczonych do stabilizacji napięcia, w których wykorzystano zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego. Szersze praktyczne zastosowanie znalazły głównie dwa rozwiązania:

- dławik z obwodem sterującym prądu stałego,
- samonasycający się dławik (SR).

#### 3.1.1. Dławik z obwodem sterującym prądu stałego

Urządzenie to pracuje najczęściej z równoległą baterią kondensatorów tworzącą filtr/filtry wyższych harmonicznych. Jest w swej istocie działaniem transduktorem, w którym wartość zmiennego prądu pierwotnego ( $I_{ac}$ , rys. 7) regulowana jest poprzez zmianę stałego prądu magnesującego  $I_{dc}$ . Uzwojenie sterujące zasilane jest najczęściej z pełnosterowalnego przekształtnika tyrystorowego (jego moc nie przekracza zazwyczaj 1% mocy całego urządzenia). Dzięki temu możliwe jest forsowanie przebiegów przejściowych prądu, a tym samym duża szybkość działania.



Rys. 7. Dławik z obwodem sterującym prądu stałego: a) jednofazowy schemat zastępczy; b) przebiegi czasowe strumieni magnetycznych ilustrujące zasadę działania kompensatora

iania urządzenia. W efekcie zmiany stałego prądu magnesującego  $I_{dc}$ , prąd pierwotny  $I_{ac}$  może zmieniać się praktycznie od zera (rdzeń nie nasycony) do wartości maksymalnej (rdzeń nasycony) w całym przedziale zmian prądu. Zgodnie z [6] w instalacjach o mocy nie większej niż 50 MVar przy 20-krotnym forsowaniu napięciowym w obwodzie sterującym można uzyskać szybkość zmian mocy bierniej dławika wynoszącą 600 — 700 MVar/s.

Układ jest zazwyczaj podłączany do sieci wysokiego napięcia bez pośrednictwa transformatora obniżającego.

W zależności od wzajemnej orientacji strumienia magnetycznego uzwojenia roboczego (pierwotnego,  $ac$ ) i strumienia sterującego ( $dc$ ) można wyróżnić trzy odmiany konstrukcyjne:

- dławik o sterowaniu podłużnym [1, 11, 14],
- dławik o sterowaniu poprzecznym [12],
- dławik z polem wirującym [10].

Praktyczne znaczenie ma głównie pierwsze rozwiązanie, w którym kierunki strumienia pierwotnego i sterującego pokrywają się.

Zasadę jego działania najłatwiej przedstawić za pomocą uproszczonej, jednofazowej wersji układu (rys. 7a). Uzwojenia umieszczone są na rdzeniu wykonanym z materiału o charakterystyce magnesowania pokazanej w wyidealizowanej formie na rysunku 7b. Uzwojenia pierwotne połączone są szeregowo, natomiast uzwojenia prądu stałego przeciwnie względem siebie. Gwarantuje to uzyskanie stanu nasycenia rdzenia zarówno dla dodatniego, jak i ujemnego półokresu przebiegu strumienia  $\Phi_{ac}$ . Napięcie zasilające powoduje wytworzenie w rdzeniu zmiennego strumienia magnetycznego o kształcie sinusoidalnym. Dla  $I_{dc} = 0$  amplituda strumienia wypadkowego  $\Phi_{\Sigma} = \Phi_{ac} + \Phi_{dc}$  nie przekracza poziomu nasycenia rdzenia. Wzrost wartości prądu  $I_{dc}$  powoduje wytworzenie strumienia  $\Phi_{dc} \neq 0$ . W pewnych przedziałach czasu strumień wypadkowy przekracza wartość odpowiadającą poziomowi nasycenia obwodu zarówno dla ujemnej, jak i dodatniej jego wartości. Czas pozostawania rdzenia w stanie nasycenia  $\beta$ , liczony w mierze kątowej (rys. 7b), wzrasta wraz ze wzrostem wartości prądu sterującego  $I_{dc}$  powodując prawie proporcjonalny wzrost podstawowej harmonicznej prądu uzwojenia pierwotnego (mocy bierniej podstawowej harmonicznej  $Q_L$ ). Dla  $\beta = \pi$  prąd ma kształt sinusoidalny, a dla  $\beta = 2\pi$  osiągnięta jest granica sterowalności. Istotną wadą tego rozwiązania są generowane wyższe harmoniczne prądów ( $wh$ ). W wersji trójfazowej (dławik Friedlandera) wzrost liczby kolumn rdzenia (6 lub 9) oraz odpowiedni sposób kojarzenia licznych uzwojeń (do 36) pozwala na praktyczną eliminację  $wh$  prądu, jednakże za cenę wzrostu czasu reakcji układu. Możliwe jest zastosowanie trzech układów jednofazowych, co pozwala również na realizację symetryzacji. Urządzenie pracuje w zamkniętym układzie regulacji, kontrolując wartość prądu stałego  $I_{dc}$  w taki sposób, aby wypadkowa moc bierna kompensatora —  $Q_{FC} + Q_L$  — gwarantowała pożądany stopień stabilizacji napięcia ( $Q_{FC}$  — moc stałej baterii kondensatorów przyłączonej równoległe do dławika).

#### Dławik o sterowaniu poprzecznym

Strumień pierwotny ( $\Phi_{ac}$ ) i strumień sterujący ( $\Phi_{dc}$ ) są wzajemnie ortogonalne. Teoretyczny brak sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniami pierwotnym i sterującym (w praktyce znaczna redukcja) pozwala skrócić czas reakcji urządzenia.

#### Dławik z polem wirującym

Układ składa się ze stojana i „wirnika” z umieszczonym w tym ostatnim uzwojeniem sterującym. Nazwa „wirnik” jest umowna, ponieważ dławik nie zawiera części wirujących —

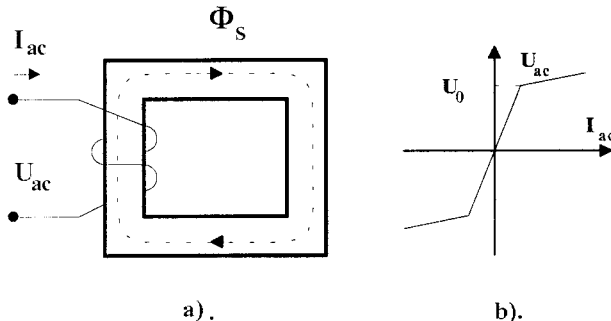
przyjęto ją przez analogię do maszyny indukcyjnej. W praktycznym wykonaniu stojan dławika w zasadzie nie różni się od stojana maszyny synchronicznej lub asynchronicznej. Zmiana prądu stałego w uzwojeniu sterującym powoduje zmianę przenikalności magnetycznej materiału, z którego wykonany jest „wirnik”, a tym samym zmianę prądów liniowych dławika.

#### 3.1.2. Samonasycający się dławik (SR)

Jest to jeden z pierwszych kompensatorów statycznych zastosowanych na skalę przemysłową do redukcji wahań napięcia i migotania światła. Może również służyć do redukcji załamań napięcia.

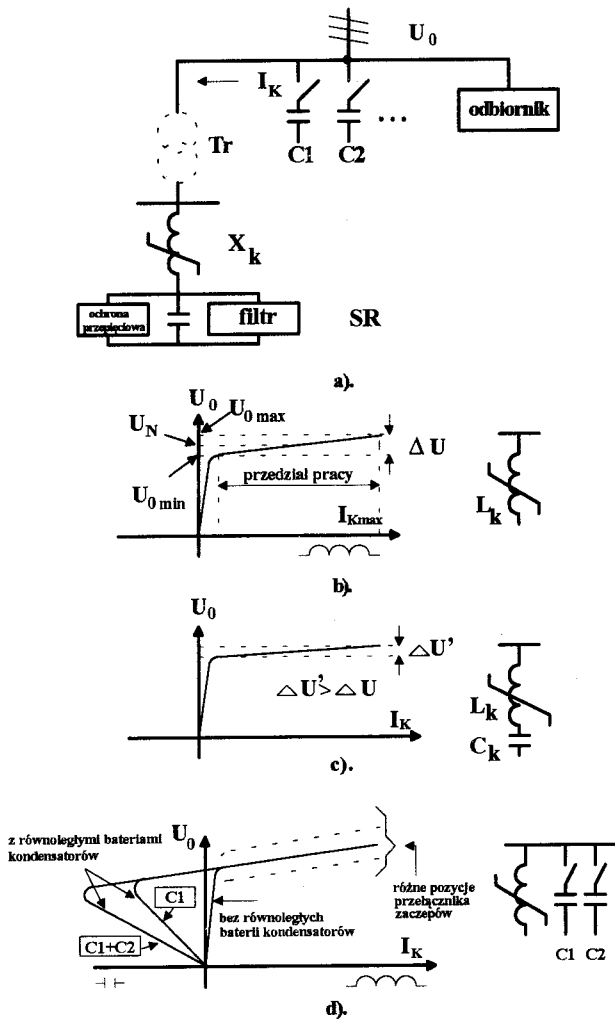
Kontrola prądu biernego dławika realizowana jest w naturalny sposób poprzez wykorzystanie własności rdzenia magnetycznego w stanie nasycenia, gdy mała zmiana napięcia zasilającego wywołuje dużą zmianę prądu.

Zasada działania samonasycającego się dławika przedstawiona jest schematycznie na rysunku 8. Głównym elementem składowym jest nasycający się obwód magnetyczny, którego wyidealizowaną charakterystykę przedstawia rysunek 8b. Technika projektowania takiego dławika zmierza do ukształtowania jego charakterystyki magnesowania, a tym samym charakterystyki prądowo-napięciowej dla podstawowej harmonicznej, z wyraźnym punktem zagięcia i liniowym przebiegiem w stanie nasycenia o niewielkim dodatnim nachyleniu w dużym przedziale zmian prądu. Przy małej wartości napięcia zasilającego dławik wychodzi ze stanu nasycenia i wywołując przepływ prądu magnesującego może być rozważany jak nie obciążony transformator. W tym stanie nie ma praktycznie żadnego wpływu na poziom napięcia.



Rys. 8. Zasada działania samonasycającego się dławika: a) schemat ideowy obwodu; b) charakterystyka magnesowania rdzenia

Kompensator jest przyłączony do sieci zasilającej najczęściej bez pośrednictwa obniżającego transformatora (rys. 9). W przypadku jego obecności jest on wyposażony w przełącznik zaciępow pod obciążeniem sterowany zdalnie w funkcji napięcia lub prądu dławika. Ten ostatni podczas pracy instalacji zmienia swą wartość od bliskiego zero do  $I_{Kmax}$ , czemu odpowiada zmiana wartości napięcia  $U_0 \in (U_{0min}, U_{0max})$  — rysunek 9b. Jeżeli wymagana jest lepsza stabilizacja napięcia, uzyskuje się ją albo poprzez odpowiednią konstrukcję dławika (duże koszty), albo własne nachylenie charakterystyki dławika, wynoszące w typowych rozwiązaniach 8–15%, kompensowane jest za pomocą kondensatora korekcji nachylenia  $C_k$  — rysunek 9c. Efektem korekcji jest pogorszenie się jakości przebiegów przejściowych i niebezpieczeństwo drgań subharmonicznych (stąd filtr subharmonicznych) oraz zmniejszenie szybkości działania układu. Osiągnięcie stanu ustalonego po każdej zmianie warunków pracy wymaga bowiem kilku okresów przebiegu napięcia.

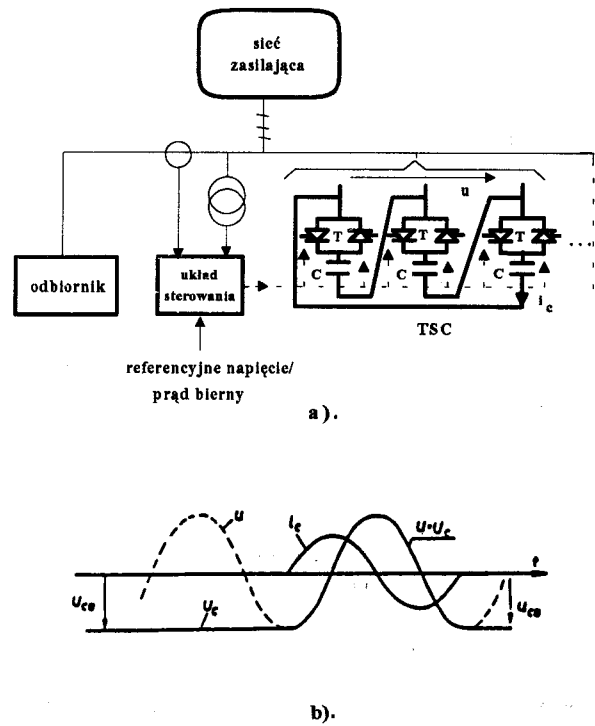


Rys. 9: a) schemat kompensatora z samonasycającym się dławikiem; b) charakterystyka naturalna dławika; c) charakterystyka z korekcją nachylenia; d) charakterystyki z równoległymi kondensatorami

Zmiana napięcia zasilającego powoduje zmianę wartości prądu biernego układu, a w ślad za tym zmianę wartości spadków napięcia na impedancji systemu zasilającego. W ten sposób kompensator pełni rolę stabilizatora i jako taki jest głównie stosowany. Układ może wywołać również przepływ pojemnościowego prądu biernego (w efekcie równoległego przyłączenia baterii kondensatorów pracujących jako filtr wh) — rysunek 9d. Baterie mogą być podzielone na sekcje (C1, C2 ...) załączane np. łącznikami tyrystorowymi, co w połączeniu z przełącznikiem zaczełów transformatora pozwala zlokalizować punkt pracy dławika w korzystnym przedziale zmian wartości napięcia.

### 3.2. Baterie kondensatorów załączane łącznikami tyrystorowymi (TSC)

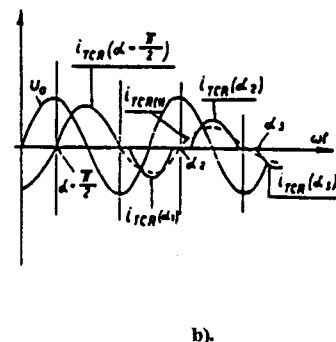
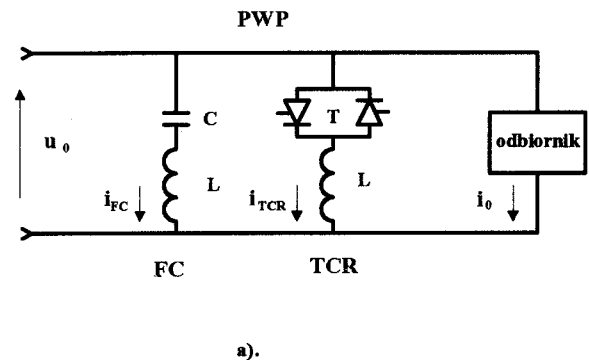
W tym rozwiązaniu międzyfazowo łączone są baterie kondensatorów podzielone na sekcje, z których każda jest załączana (lub wyłączana) indywidualnie za pomocą łączników tyrystorowych prądu przemiennego. Wartość zastępczych susceptancji kompensatora zmienia się więc w sposób dyskretny w zależności od liczby przewodzących sekcji (rys. 10a). Poprzez wybór odpowiednio dużej ich ilości można uzyskać dowolnie małą zastępczą susceptancję pojedynczego stopnia. Synchronizacja momentu załączania łącznika oraz wstępne naładowanie baterii pozwala uniknąć przetężeń i przepięć, które towarzyszą zwykle łą-



Rys. 10: a) schemat kompensatora statycznego z bateriami kondensatorów załączanymi łącznikami tyrystorowymi; b) przebiegi napięcia i prądu przy łączeniu kondensatora

czeniu kondensatorów (rys. 10b). Czas reakcji przy pracy symetrycznej nie przekracza 20 ms.

W 1981 roku uruchomiono w jednej z kopalń pierwszą w Polsce przemysłową instalację tego typu, przeznaczoną do kompensacji mocy biernych maszyny wyciągowej [4, 19].



Rys. 11: a) jednofazowy schemat zastępczy układu FC/TCR; b) przebiegi czasowe napięcia i prądu ilustrujące zasadę działania

### 3.3. Układ ze stałą baterią kondensatorów (FC) oraz sterownikiem podstawowej harmonicznej prądu indukcyjnego (TCR)

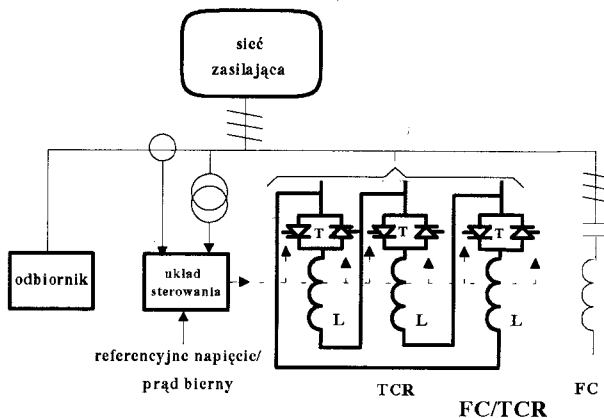
Rozwiązanie to jest przykładem pośredniej metody kompensacji, w której, w zależności od potrzeb wynikających z funkcji stabilizatora napięcia lub kompensatora mocy biernej, regulowana jest wartość sumy dwóch składowych prądu (rys. 11):

- podstawowej harmonicznej prądu  $i_{FC}$  kondensatora, pracującego prawie zawsze jako filtr/filtry  $wh$  lub jako przelączalne stopnie kondensatorów (układ TCR/TSC),
- podstawowej harmonicznej prądu dławika  $i_{TCR}$  regulowanej poprzez sterowanie fazowe tyrystorowego łącznika prądu przemiennego (T).

Rysunek 11a przedstawia jednofazowy schemat ideowy takiej instalacji, a rysunek 11b — przebiegi czasowe prądu dławika dla różnych wartości kąta wysterowania  $\alpha$  (odniesionego do punktów zerowania się napięcia). Kąt ten, a wraz z nim wartość podstawowej harmonicznej prądu dławika  $i_{TCR}$  i podstawowej harmonicznej prądu kompensatora (również wartość i znak spadku napięcia na impedancji systemu), może zmieniać się w każdym półokresie napięcia zasilania przyjmując dowolne wartości z przedziału  $(\pi/2, \pi)$ .

Na rysunku 11 nie uwzględniono niezbędnego na ogół dopasowania napięciowego — za pośrednictwem transformatora — poszczególnych elementów kompensatora. W klasycznej trójfazowej konfiguracji gałęzie dławikowe połączone są w trójkąt i wraz z równoległymi filtrami  $wh$  stanowią dla sieci zasilającej połączone międzyfazowo zastępcze susceptancje (rys. 12). Ich wartości zmieniają się na skutek zmiany kątów wysterowania ( $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{21}, 1, 2, 3$ , — numery porządkowe faz) w sposób od siebie niezależny i bezstopniowy. Rolę dławika mogą pełnić również reaktancje zastępcze transformatora o dużym napięciu zwarcia (tzw. układ „thyristor controlled transformer”).

W krajowym przemyśle wydobywczym pracuje kilka instalacji FC/TCR przeznaczonych głównie do poprawy gospodarki mocą bierną [3, 5, 20].



Rys. 12. Schemat ideowy zamkniętego układu sterowania kompensatora FC/TCR

### 3.4. Układ TSC/TCR

Rozwiązanie to, stosowane prawie wyłącznie w układach stabilizacji napięcia, łączy zalety układu TSC i FC/TCR. Pozwala minimalizować wartość  $wh$  prądów wytwarzanych podczas pracy TCR oraz minimalizować straty mocy czynnej w instalacji kompensacyjnej.

### 3.5. Przekształtnikowe źródła prądu/mocy biernej o komutacji wymuszonej

Wywołanie przepływu pojemnościowego prądu biernej (dla podstawowej harmonicznej) wymaga załączenia elementów półprzewodnikowych przed naturalnym punktem komutacji.

Przykładem takich rozwiązań może być:

- mostek tyrystorowy o komutacji wymuszonej — przebieg prądu liniowego, typowy dla tej topologii obwodu, zawiera wyższe harmoniczne niskich rzędów o znacznych wartościach,
- układy przekształtnikowe PWM.

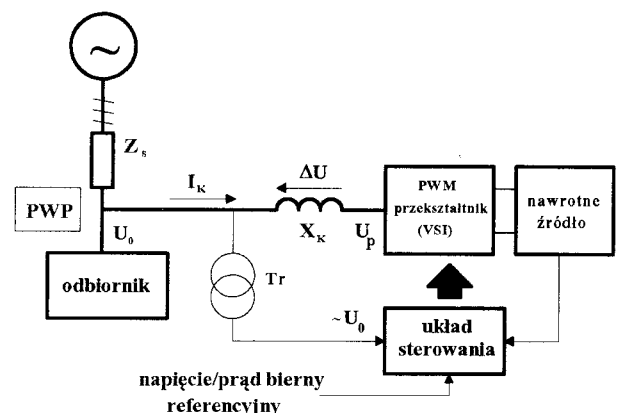
Drugie rozwiązanie, coraz powszechniejsze w przemysłowych instalacjach, charakteryzuje się znaczną redukcją zawartości  $wh$  prądu szczególnie przy dużej częstotliwości pracy; istnieje możliwość wykorzystania techniki wielopulsowej lub optymalizowania wzorca łączeniowego w celu redukcji wartości współczynnika odkształcenia prądu (THD). Zawiera ono przekształtnik CSI (current source inverter) lub VSI (voltage source inverter), którego stany łączeniowe elementów półprzewodnikowych decydują o wartości, a w wielu przypadkach również o charakterze mocy biernej kompensatora (indukcyjna lub pojemnościowa). Mogą być one traktowane jako przykłady aktywnych układów kompensacji, których dalszy rozwój doprowadził w konsekwencji do współczesnych rozwiązań energetycznych filtrów aktywnych.

W literaturze opisano dużą liczbę różnych, praktycznych rozwiązań takich kompensatorów. Każdy z nich jest najczęściej odrębnym układem o charakterystycznych typowych dla niego szczegółowych cechach. Możliwości takiego kompensatora są analogiczne jak maszyny synchronicznej (ale o znacznie większej szybkości działania). Podobny jest też jego schemat ideowy, który wraz z kompensowanym odbiornikiem został przedstawiony na rysunku 13, gdzie:

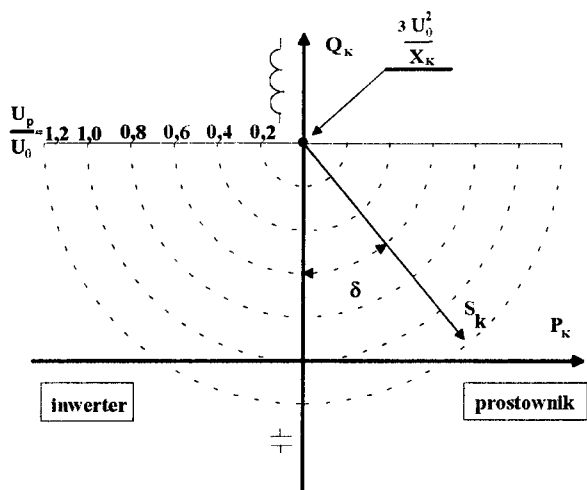
- $X_k$  — reaktancja dławika lub transformatora przekształtnikowego,
  - $U_p$  — napięcie fazowe na zaciskach przekształtnika,
  - $\Delta U$  — spadek napięcia na reaktancji wejściowej przekształtnika ( $= X_k, I_k$ ),
  - $I_k$  — podstawowa harmoniczna prądu kompensatora.
- Przyjmując:

$$U_{01} = U_0 e^{j\delta_1} \quad U_p = U_0 e^{j\delta_2} \quad (1)$$

gdzie  $\delta_1$  i  $\delta_2$  są początkowymi fazami wskazów napięć w PWP i napięcia wyjściowego przekształtnika, prąd kompensatora opisany jest związkiem:



Rys. 13. Schemat ideowy aktywnego, statycznego generatora prądu biernej podstawowej harmonicznej (VSI)



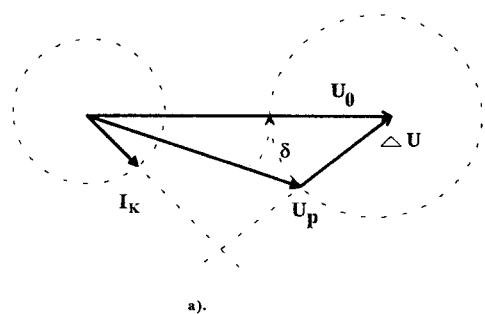
Rys. 14. Wykres mocy kompensatora w układzie współrzędnych  $P_k - Q_k$

$$I_k = \frac{U_0 - U_p}{jX_k} = \frac{U_0 \sin \delta_1 - U_p \sin \delta_2}{X_k} - j \frac{U_0 \cos \delta_1 - U_p \cos \delta_2}{X_k} \quad (2)$$

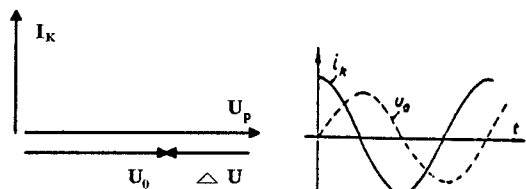
Moc pozorna  $S_k$  kompensatora:

$$S_k = 3U_0 I_k^* = 3 \frac{U_0 U_p \sin \delta}{X_k} - j \left[ \frac{U_0 U_p \cos \delta}{X_k} - \frac{U_0^2}{X_k} \right] = P_k + jQ_k \quad (3)$$

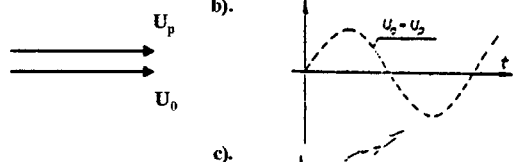
gdzie  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ . Na podstawie zależności 3 przedstawiono na rysunku 14 wykres mocy kompensatora w układzie współrzędnych  $P_k - Q_k$ . Jego postać analityczną opisuje zależność (4):



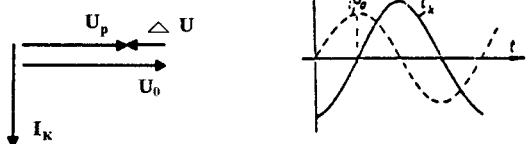
a).



b).



c).



d).

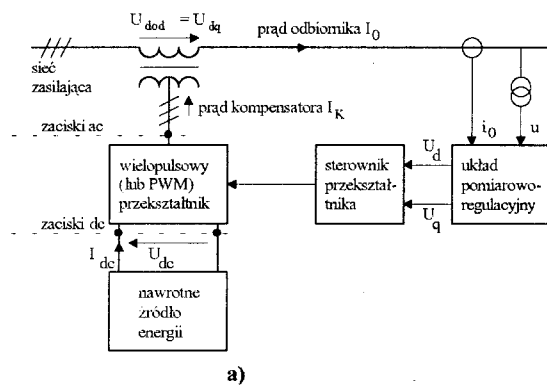
Rys. 15. Wykresy wskazowe ilustrujące pracę kompensatora: a) dla  $I_k, U_0 = \text{const}, \delta = \text{var}$ ; b), c), d) dla wyróżnionych przypadków, gdy kompensator jest odbiornikiem wyłącznie mocy biernej lub znajduje się w stanie biegu jałowego

$$P_k^2 + (Q_k - \frac{3U_0^2}{X_k})^2 = (\frac{3U_0 U_p}{X_k})^2 \quad (4)$$

Zasadę działania układu przedstawiono na rysunku 15 za pomocą wykresów wskazowych dla przykładowo wybranych wartości kąta  $\delta$ . Zmiana amplitudy składowej podstawowej napięcia wyjściowego przekształtnika  $U_p$  (dla  $\delta = 0$ ) pozwala uzyskać prąd/moc bierną o charakterze zarówno pojemnościowym, jak i indukcyjnym (rys. 15b i d). Na rysunku 15a przedstawiono, za pomocą dwóch okręgów o promieniach odpowiednio  $I_k$  i  $U_0 = \text{const}$ , zmianę wartości napięcia  $U_p$ . Dla zadanego napięcia  $U_0 = \text{const}$  i reaktancji  $X_k$  wartość mocy  $P_k$  i  $Q_k$  może ulegać zmianie w następstwie zmiany wartości kąta  $\delta$ . Jak wynika z zależności (3):

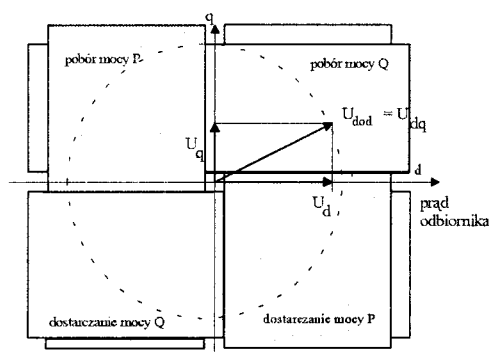
- dla  $\delta < 0$  kompensator pobiera moc czynną z sieci zasilającej,
- dla  $\delta > 0$  kompensator oddaje moc czynną do sieci zasilającej,
- dla  $\delta = 0$  kompensator pobiera wyłącznie moc bierną o charakterze pojemnościowym, gdy  $U_p > U_0$  (rys. 15b), lub indukcyjnym, gdy  $U_p < U_0$  (rys. 15d).

Przedstawione na rysunku 15 wykresy wskazowe dotyczą wyidealizowanego przypadku, gdy nie są uwzględniane straty mocy czynnej w kompensatorze.



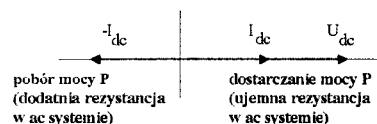
a)

na zaciskach ac



b)

na zaciskach dc



c)

Rys. 16: a) schemat ideowy szeregowego kompensatora; b) możliwe stany pracy wyróżnione oddawaniem lub pobieraniem mocy czynnej i biernej; c) wykres wskazowy dla obwodu prądu stałego przekształtnika

Prócz równoległego stabilizatora napięcia, istnieje możliwość praktycznej realizacji stabilizatora szeregowego, funkcjonującego na zasadzie transformatora dodawczego (również przesuwnika fazowego napięcia dodawczego). Celem działania takiego układu jest wytworzenie, np. za pomocą układu przekształtnikowego PWM, dodawczego napięcia  $U_{dod}$ , którego wartość i faza — w relacji do prądu odbiornika  $I_0$  — podlegają regulacji. Schemat ideowy takiego układu jest przedstawiony na rysunku 16.

W ogólnym przypadku taka topologia obwodu pozwala kontrolować przepływ mocy, zarówno czynnej, jak i biernej, jak również wartość impedancji linii zasilającej.

Wielopulsowy (lub PWM) przekształtnik może być traktowany jako idealne źródło napięcia — synchronizowane napięciem sieci zasilającej — reprezentowane na płaszczyźnie dq przez dwie ortogonalne składowe o regulowanych wartościach (rys. 16):

składowa  $U_d$  — regulacja składowej współfazowej lub w przeciwfazie do prądu liniowego decyduje o wymianie mocy czynnej pomiędzy systemem zasilającym i kompensatorem;

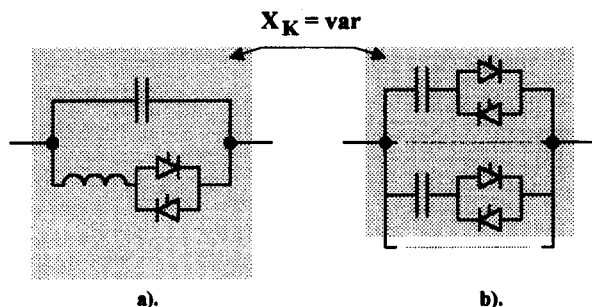
składowa  $U_q$  — regulacja składowej napięcia ortogonalnej do prądu liniowego decyduje o wartości (również charakterze) mocy biernej kompensatora szeregowego.

Jeżeli harmoniczna podstawowa napięcia wyjściowego, proporcjonalna i ortogonalna do prądu liniowego, spóźnia się względem tego ostatniego, wówczas kompensator szeregowy realizuje kompensację spadku napięcia/reaktancji zastępczej linii zasilającej, analogicznie jak kondensatory szeregowe  $X_C$ . Wartość napięcia wyjściowego przekształtnika określona jest wówczas zależnością:

$$\underline{U}_{dod} = -jkX_S I_0 \quad (5)$$

gdzie  $X_S$  jest reaktancją fazową sieci zasilającej,  $I_0$  wartością prądu liniowego, a współczynnik proporcjonalności ( $k$ ) stopniem szeregowej kompensacji.

Jeżeli przekształtnik ma dodatkowo możliwość realizacji takiego stanu pracy, w którym napięcie wyjściowe kompensatora wyprzedza prąd liniowy o kąt  $\pi/2$ , wówczas jest to równoznaczne ze wzrostem efektywnej reaktancji linii zasilającej. Stan ten pozwala na bardzo skuteczne tłumienie oscylacji mocy w systemie oraz ograniczenie wzrostu napięcia na odbiorczym końcu linii. Koncepcja ta jest więc alternatywą dla układów przedstawionych schematycznie na rysunku 17, w przypadku których zmiana reaktancji zastępczej linii zasilającej realizowana jest poprzez zmianę reaktancji (za pomocą tyrystorowych łączników prądu przemiennego) szeregowo przyłączonych elementów biernych.



Rys. 17. Zmienna reaktancja szeregowego kompensatora ( $X_K$ ) realizowana w układzie: a) FC/TCR; b) TSC

## 4. ZAKOŃCZENIE

Rozwój energoelektroniki, a głównie technologii produkcji elementów półprzewodnikowych, pozwala obecnie na realizację układów o coraz większych mocach jednostkowych przy równoczesnej minimalizacji ich kosztów zarówno inwestycyjnych, jak i eksploatacyjnych. Opracowane, złożone algorytmy sterowania oraz dostępność urządzeń pozwalających na szybką ich realizację umożliwia wyposażenie tych układów w wielorakie funkcje użytkowe, istotne z punktu widzenia właściwej pracy systemu energetycznego, w tym również funkcję stabilizacji napięcia w stanach dynamicznych. Jeżeli przyjąć za początek historycznej drogi rozwoju przemysłowych stabilizatorów napięcia maszyny synchronicznej, to należy stwierdzić, że współczesna energoelektronika oferuje bardzo liczną rodzinę różnych rozwiązań technicznych pełniących między innymi zadanie stabilizacji. Urządzenia takie określane są w angielskiej literaturze ogólnym mianem *układów elastycznej (regulowanej) transmisji energii prądu przemiennego FACTS (Flexible AC Transmission System)*. Stanowią one w swej istocie bardzo wyrafinowane techniczne rozwiązania tworzące nową jakość we współczesnej elektroenergetyce.

## LITERATURA

1. Becker H., Brandes D., Gappa K.: *Three phase shunt reactors with continuously controlled reactive current*. CIGRE, 1972, 31–13.
2. Gyugyi L., Pelly B.R.: *Static power frequency changer*. John Wiley & Sons, N.York 1976.
3. Hanzelka Z., Piróg S.: *Symmetrical follow-up static reactive current compensator*. IEEE Applied Power Electronics Conference, San Diego, California 1993.
4. Hanzelka Z.: *Skuteczność statycznej kompensacji oddziaływania odbiorników niespokojnych na sieć zasilającą*. Monografie, AGH, Kraków 1994, 6.
5. Hanzelka Z.: *Kompensator statyczny ze sterownikiem prądu indukcyjnego*. Rozprawy Elektrotechniczne 1988, 34, 1.
6. Jäger S.: *Bispiele von Anlagen zur Blindstromkompensation, Symmetrisierung und Spannungsunterstützung industrieller Elektrowärmanlagen*. Elektrowärme International 1974, 32, 6.
7. Kahlen H., Pautz J.: *Über die Notwendigkeit von Kompensationsanlagen in elektrischen Versorgungsnetzen*. Elektrowärme International 1988, 46, 1.
8. Kimura N., Funaki T., Dahroji K., Matsura K., Takenaka K.: *Improving stability of power system by forced commutation static var compensator*. EPE Conf. Brighton 1993.
9. Kojori H. A., Dewan S. B., Lavers J. D.: *A large-scale PWM solid-state synchronous condenser*. IEEE Trans., 1992, 1A, 29, 1, 41–49.
10. Libkind M. C.: *Controlled reactor in supply network*. The publication of the Science Academy 1961.
11. Marthur R. M.: *Static compensator for reactive power control*. Committee on Static Compensation, Winnipeg, Canada, 1984.
12. Mastrykov L. A., Yzaikov V. I.: *Controllable power reactors with orthogonal working and control magnetic fields*. Int. Word Electrotechnical Congress, Moscow, 1977.
13. März G.: *Die Blindleistungschwankungen bei Lichtbogenofen und ihre kompensierung mit Hilfe elektronisch regelbarer Phasen-schieber*. Elektrowärme International 1972, 2.
14. Miller J. E.: *Reactive power control in electric systems*. John Wiley & Sons, N. York 1982.
15. Moran L., Ziogas P. D., Joos G.: *Analysis and design of a three-phase current source solid-state var compensator*. IEEE Trans., 1989, 1A, 25, 2.
16. Moran L. J., Ziogas P. D., Joos G.: *Analysis and design of a novel 3-solid-state power factor compensator and harmonic suppressor system*. IEEE Trans., 1989, 1A, 25, 4.
17. Mori S., Matsuno K., Takeda M., Seto M.: *Development of large static Var generator using self-commutated inverters for improving power system stability*. IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8, 1, 371–377.
18. Orzechowski T.: *Optymalne wykorzystanie silników synchronicznych w układach napędowych i kompensacji*. ZN AGH, Elektrotechnika 1991, 19.
19. Piróg S.: *Sterowanie trójfazowymi, symetryzującymi energoelektronicznymi kompensatorami mocy biernej*. ZN AGH, 1989, 14.



20. Piróg S.: *Statyczny, symetryczny nadprądowy kompensator prądu biernego*. XIV Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów. Pl. Sl. i Kom. Elektrotechniki PAN 1991.
21. Piróg S.: *Follow up control of three phase hybrid reactive current compensator*. EDPE High Tatra, 1993, Slovakia.
22. Satoshi U., Minoru A., Hirotaka C., Ryuichi S.: *Active power filter using solid state phase shifter*. EPE Conf. Brighton 1993.
23. Schauder C., Mehta H.: *Vector analysis and control of advanced static VAR compensators*. IEE Proc. C, 140, 1993, 4, 299–306.
24. Thanawala H. L., Kelham W. O., Crawshaw A. M.: *Static compensators using thyristor control with saturated reactors and with low reactance linear reactors*. Seminar on control of reactive compensation for AC power systems, 8–9 Sept. 1980, London.
25. Walker L.: *Force-commutated reactive power compensator*. IEEE Trans., 1986, IA, 22, 6, 1091–1104.



#### **Prof. dr hab. inż. Ryszard Koziół**

Urodzony w 1930 r., ukończył Wydział Elektrotechniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w 1957. W latach 1957–1962 pracował w Przedsiębiorstwie Robót Elektrycznych „Elektromontaż” w Nowej Hucie. Od 1962 roku zaczął pracować na Akademii Górniczo-Hutniczej i w 1967 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 1977 tytuł doktora habilitowanego. Przedmiotem jego zainteresowania są zagadnienia związane z automatyką napędu elektrycznego i teorią sterowania.

Jest profesorem zwyczajnym i kierownikiem Katedry Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH. Jest wiceprzewodniczącym Komisji Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki PAN Oddziału Krakowskiego. Autor ponad 200 artykułów i referatów oraz 15 książek. Jest równocześnie profesorem Akademii Wychowania Fizycznego w Krakowie, w Zakładzie Teorii Sportu.



#### **Dr inż. Zbigniew Hanzelka**

Ukończył w 1974 roku studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH. Od 1975 pracuje początkowo w Instytucie, a później Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, obecnie na stanowisku adiunkta. W roku 1982 uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Głównym przedmiotem jego zainteresowań zawodowych jest problematyka jakości zasilania odbiorników przemysłowych, a w szczególności zagadnienia statycznej kompensacji i filtracji. Jest członkiem krajowych i międzynarodowych komitetów zajmujących się problematyką jakości energii elektrycznej, w tym m.in.: Międzynarodowego Komitetu Elektrotermii (Grupa Robocza — Jakość energii elektrycznej), Komitetu Technicznego 77A Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC), Normalizacyjnej Komisji Problemowej ds. Kompatybilności Elektromagnetycznej.

dzynarodowych komitetów zajmujących się problematyką jakości energii elektrycznej, w tym m.in.: Międzynarodowego Komitetu Elektrotermii (Grupa Robocza — Jakość energii elektrycznej), Komitetu Technicznego 77A Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC), Normalizacyjnej Komisji Problemowej ds. Kompatybilności Elektromagnetycznej.



#### **Dr hab. inż. Stanisław Piróg**

Urodzony w 1947 r., ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w 1972, gdzie w 1977 doktoryzował się, a w 1990 habilitował. Od roku 1972 pracuje w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH w Krakowie — aktualnie na stanowisku adiunkta. Autor wielu publikacji i wystąpień konferencyjnych z zakresu kompensacji prądów biernych, energoelektroniki i napędu elektrycznego. Współautor wielu rozwiązań chronionych patentem i wdrożonych do praktyki przemysłowej. Członek Sekcji Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego Komitetu Elektrotechniki PAN, rzeczoznawca SEP w zakresie energoelektroniki i napędu elektrycznego.

tem i wdrożonych do praktyki przemysłowej. Członek Sekcji Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego Komitetu Elektrotechniki PAN, rzeczoznawca SEP w zakresie energoelektroniki i napędu elektrycznego.

