

mgr inż. JULIAN WOSIK
dr inż. MARIAN KALUS
Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG
prof. dr hab. inż. BOGDAN MIEDZIŃSKI
Politechnika Wroclawska

Badania symulacyjne efektywności kompensacji mocy biernej odbiorów nieliniowych w oparciu o teorię składowych fizycznych prądu – TSFP

W artykule omówiono teoretyczne podstawy kompensacji mocy biernej według teorii składowych fizycznych prądu – TSFP. Na bazie tej teorii zbudowano modele symulacyjne i przeprowadzono (przy użyciu oprogramowania MATLAB/SIMULINK) modelowanie procesu kompensacji mocy dla różnych odbiorników liniowych i nieliniowych, przy obciążeniu symetrycznym i niesymetrycznym oraz różnych wartościach obciążeń. Została zaprezentowana metoda prądu dodawczego, wykorzystująca (w sensie realizacji technicznej w obwodzie silnoprądowym) idealny falownik prądowy w celu uzyskania płynnej kompensacji mocy biernej. Sformułowano wnioski wynikające z uzyskanych badań symulacyjnych.

1. WPROWADZENIE

Problematyka poprawy jakości energii elektrycznej należy do pierwszoplanowych zagadnień współczesnej elektrotechniki (energoelektroniki). Jednym z wielu czynników prowadzących do zwiększenia jakości energii elektrycznej jest redukcja wartości wyższych harmonicznych prądu, a tym samym redukcja skutków ich obecności. Teoretyczne podstawy zmiany właściwości układów elektroenergetycznych stanowi najczęściej teoria mocy chwilowej $p-q$, adoptowana do różnych struktur układów zasilających (jednofazowych, dwufazowych, trójfazowych – trójprzewodowych, trójfazowych – cztero-przewodowych). Wśród urządzeń służących do eliminacji wyższych harmonicznych w sieciach elektroenergetycznych jednym z atrakcyjniejszych rozwiązań jest energetyczny filtr aktywny (EFA). Obecnie jego rolą jest nie tylko eliminacja wyższych harmonicznych, lecz często także kompensacja mocy biernej, symetryzacja, stabilizacja (regulacja) napięcia itp. Opracowanie EFA wynika z zapotrzebowania na urządzenie uniwersalne, dynamiczne

oraz samodostrajające się do stanu pracy sieci zasilającej w danym punkcie wspólnego przyłączenia, umożliwiające eliminację zaburzeń oraz poprawę parametrów pracy sieci elektroenergetycznych w obliczu degradacji jakości energii elektrycznej, w tym intensywnego wzrostu zanieczyszczeń harmonicznych oraz wad tradycyjnych metod redukcji ich negatywnych skutków. Badania dotyczące filtrów aktywnych rozpoczęto już w drugiej połowie lat 60. XX wieku. Przełomowym momentem dla rozwoju aktywnej filtracji było przedstawienie w 1983 roku przez Akagi'ego, Nabae'a i Kanazawa'ę teorii mocy chwilowych $p-q$. Wyniki badań symulacyjnych kompensacji mocy biernej w obwodach trójfazowych, niesymetrycznych i z odbiorem nieliniowym w oparciu o algorytm wynikający z teorii mocy chwilowej $p-q$ przedstawiono w publikacji [3]. W roku 1984 została zaproponowana przez L. S. Czarneckiego teoria mocy, opracowana w dziedzinie częstotliwości, zwana teorią składowych fizycznych prądu (Currents Physical Components – CPC). Poza celami poznawczymi teoria ta umożliwia również realizację celów praktycznych, prowadzących do poprawy współczynnika mocy.

2. TEORIA MOCY BAZUJĄCA NA TEORII SKŁADOWYCH FIZYCZNYCH PRĄDU – TSFP

Autor tej teorii, Leszek S. Czarnecki, biorąc z teorii mocy Fryzego koncepcję prądu czynnego, z teorii Shepherd'a i Zikikhaniego koncepcję prądu biernego oraz wprowadzając nową składową nazwaną prądem rozrzutu, zaproponował ortogonalny rozkład prądu źródła zasilającego jednofazowy odbiornik liniowy. Początkowo teoria ta dotyczyła jedynie systemów jednofazowych, jednak rozwijana stopniowo, rozszerzona została na systemy trójfazowe. Jej pełna postać przedstawiona została w 1994 roku w publikacji [1]. Teoria ta znana jest pod nazwą „teoria mocy Czarneckiego” lub „teoria mocy bazująca na teorii składowych fizycznych prądu – TSFP”. Umożliwia ona fizyczną interpretację zjawisk energetycznych, zachodzących w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów oraz w warunkach asymetrii prądów odbiornika i asymetrii napięć zasilających.

2.1. Składowe prądu odbiornika

Ogólny schemat rozważanego trójfazowego, trójprzewodowego systemu elektroenergetycznego przedstawiono na rysunku 1. Źródło zasilania ma niezerową impedancję wewnętrzną Z_S , zatem te same harmoniczne występują zarówno w napięciach, jak i w prądach. N oznacza zbiór harmonicznych, które występują w napięciu u i prądzie i . Napięcia fazowe wyrażono za pomocą szeregów Fouriera i przedstawiono w formie wektora kolumnowego u :

$$u = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sum_{n \in N} u_n = \sum_{n \in N} \begin{bmatrix} u_{na} \\ u_{nb} \\ u_{nc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N} \begin{bmatrix} \underline{U}_{na} \\ \underline{U}_{nb} \\ \underline{U}_{nc} \end{bmatrix} \cdot e^{jn\omega t} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N} \underline{U}_n \cdot e^{jn\omega t} \quad (1)$$

Prądy fazowe przedstawiono, analogicznie jak napięcia, za pomocą wektora kolumnowego i :

$$i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sum_{n \in N} i_n = \sum_{n \in N} \begin{bmatrix} i_{na} \\ i_{nb} \\ i_{nc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N} \begin{bmatrix} \underline{I}_{na} \\ \underline{I}_{nb} \\ \underline{I}_{nc} \end{bmatrix} \cdot e^{jn\omega t} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N} \underline{I}_n \cdot e^{jn\omega t} \quad (2)$$

Zespolona moc pozorna harmonicznej n -tego rzędu \underline{S}_n jest równa:

$$\underline{S}_n = \underline{U}_n^T \cdot \underline{I}_n^* = P_n + jQ_n \quad (3)$$

gdzie P_n i Q_n oznaczają moc czynną i bierną odbiornika dla harmonicznej n -tego rzędu. Jeżeli odbiornik jest pasywny i liniowy, to wówczas moc czynna P_n , przekazywana ze źródła zasilania do odbiornika, nie może być ujemna, tzn. dla każdej harmonicznej n -tego rzędu $P_n \geq 0$. Jeżeli którykolwiek z powyższych warunków nie jest spełniony, to prądy wyższych harmonicznych mogą być „generowane” w odbiorniku. Energia związana z tymi harmonicznymi może być przekazywana z odbiornika do źródła zasilania, tzn. $P_n < 0$. Wobec tego, na podstawie znaku P_n , zbiór wszystkich rzędów harmonicznych N może zostać podzielony na dwa rozłączne podzbiory N_A i N_B :

$$\text{jeżeli } P_n \geq 0 \text{ to } n \in N_A, \text{ jeżeli } P_n < 0 \text{ to } n \in N_B \quad (4)$$

Stąd napięcie u , prąd i oraz moc czynną P rozłożono na następujące składowe:

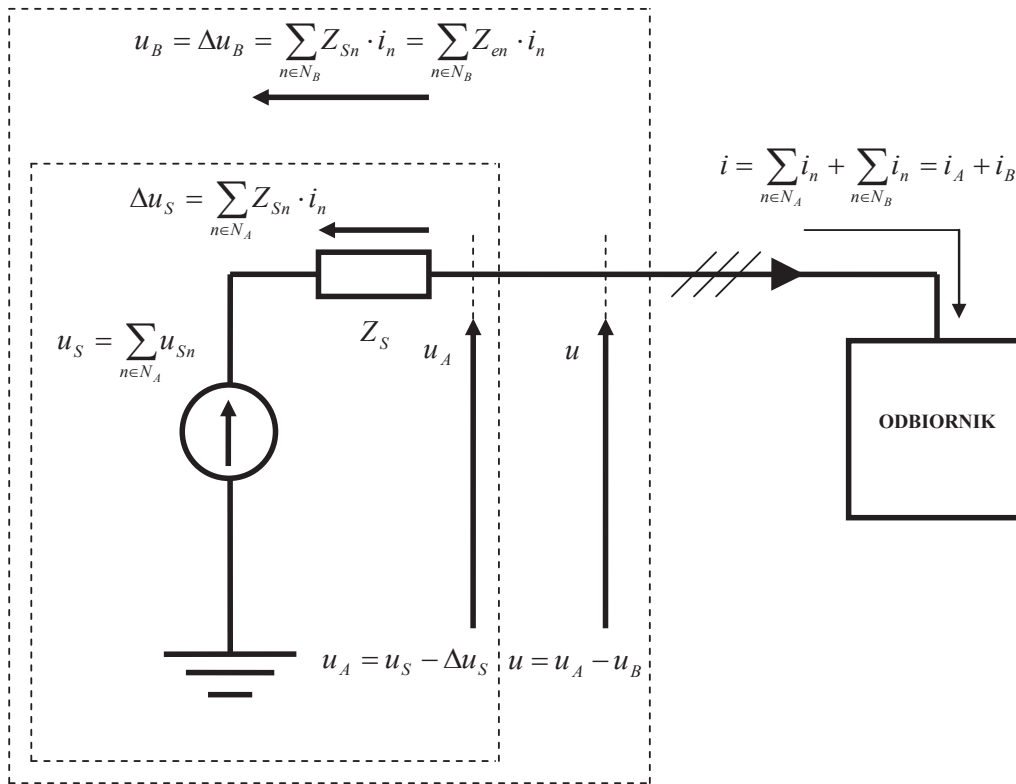
$$i = \sum_{n \in N} i_n = \sum_{n \in N_A} i_n + \sum_{n \in N_B} i_n = i_A + i_B \quad (5)$$

$$u = \sum_{n \in N} u_n = \sum_{n \in N_A} u_n + \sum_{n \in N_B} u_n = u_A - u_B \quad (6)$$

$$P = \sum_{n \in N} P_n = \sum_{n \in N_A} P_n - \sum_{n \in N_B} P_n = P_A - P_B \quad (7)$$

Obwód elektryczny dla harmonicznych ze zbioru N_A lub N_B , do którego dostarczana jest moc czynna, może być traktowany jako obwód pasywny. Zatem odbiornik może być traktowany jako pasywny dla harmonicznych ze zbioru N_A . Natomiast obwód źródła zasilania może być traktowany jako pasywny odbiornik dla harmonicznych ze zbioru N_B . Dla obydwu przypadków można znaleźć równoważne obwoły z taką samą mocą pozorną \underline{S}_n , prądem i_n oraz napięciem u_n , jak obserwowane w obwodzie oryginalnym. Równoważny obwód elektryczny dla odbiornika, przy założeniu symetrii, ma taką samą moc pozorną \underline{S}_n , jak oryginalny odbiornik, jeżeli jego admitancja fazowa określona jest zależnością (8) i wywołuje przepływ prądu i_b o wartości określonej zależnością (9).

$$\underline{Y}_{en} = \begin{cases} \frac{\underline{S}_n^*}{\|u_n\|^2} = G_{en} + jB_{en}, & \text{dla } n \in N_A \\ 0, & \text{dla } n \in N_B \end{cases} \quad (8)$$



Rys. 1. Ogólny schemat systemu elektroenergetycznego [1]

(u_S – napięcie źródła zasilania; $u = u_A - u_B$ – napięcie zasilające odbiornik; i – prąd odbiornika, Z_S – impedancja zastępcza sieci zasilającej; $\Delta u_S, u_B$ – spadki napięcia na Z_S pochodzące od i_A i i_B ;

N_A – zbiór harmonicznnych, które występują w u_A i i_A ;

N_B – zbiór harmonicznnych, które występują w i_B i u_B)

$$i_b = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum Y_{en} \cdot \underline{U}_{An} e^{j\omega t} \quad (9)$$

Prąd fazowy i_b obwodu równoważnego jest symetryczny, ale prąd i_A może być asymetryczny. Zatem prąd i_A może zawierać oprócz prądu i_b dodatkową składową, która została nazwana prądem niezrównoważenia i_u :

$$i_u = i_A - i_b \quad (10)$$

Prąd i_b tworzy układ składowej symetrycznej o kierunku wirowania zgodnym z napięciem u_A . Natomiast prąd niezrównoważenia i_u tworzy układ składowej symetrycznej o przeciwnym kierunku wirowania w stosunku do napięcia u_A . Skuteczna wartość zespolona I_{una} harmonicznnej n -tego rzędu prądu niezrównoważenia w fazie a może być wyrażona jako:

$$I_{una} = I_{na} - I_{bna} = \left(\frac{I_{ua}}{U_{na}} - Y_{en} \right) \cdot \underline{U}_{na} = \underline{A}_{na} \cdot \underline{U}_{na} \quad (11)$$

Analogicznie można przedstawić prądy I_{unb} i I_{unc} w fazach b i c . Admitancje $\underline{A}_{na}, \underline{A}_{nb}, \underline{A}_{nc}$ zapisano w postaci macierzy diagonalnej:

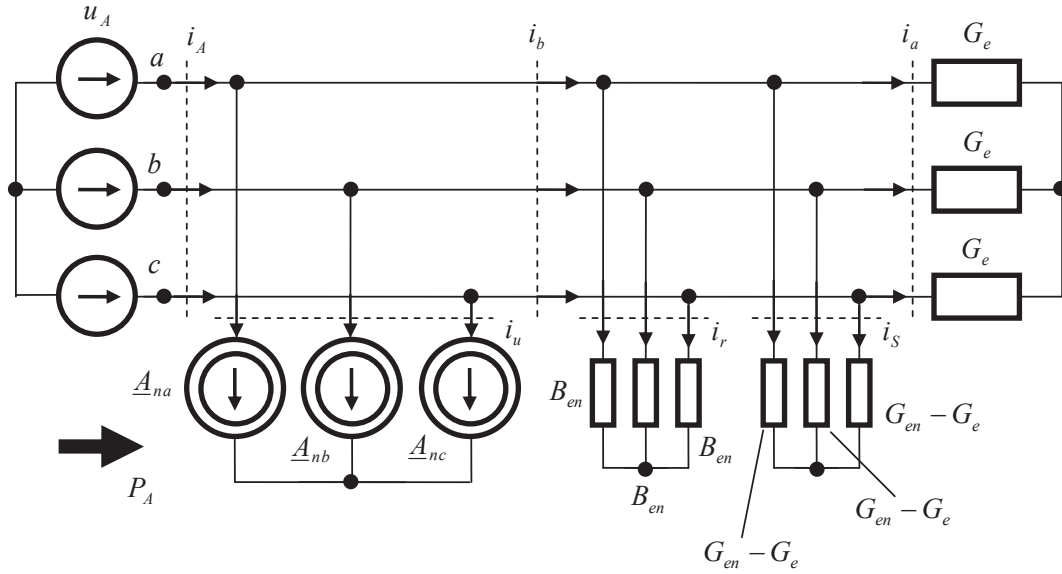
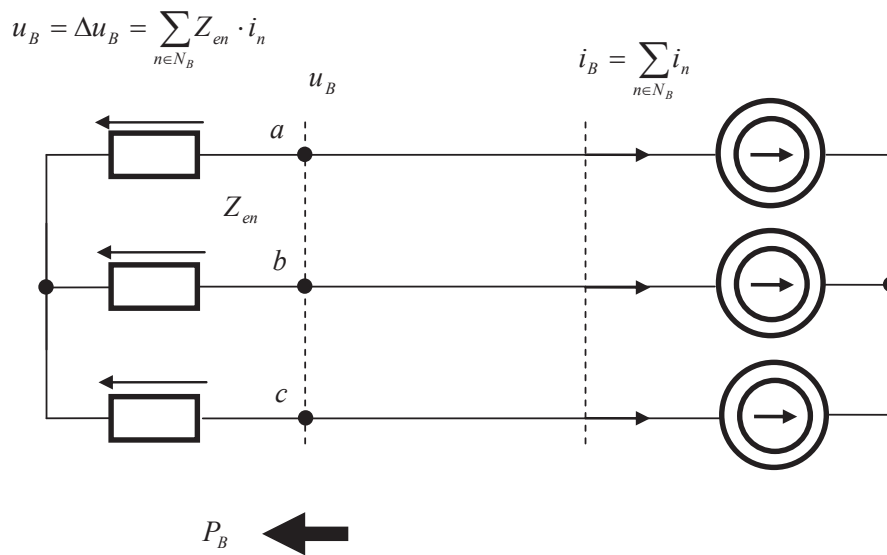
$$\underline{A}_n = \begin{bmatrix} \underline{A}_{na} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{A}_{nb} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{A}_{nc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Zatem prąd niezrównoważenia i_u został wyrażony w następującej postaci:

$$i_u = \sum_{n \in N_A} i_{un} = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum \underline{A}_n \cdot \underline{U}_{An} e^{j\omega t} \quad (13)$$

Prąd ten można traktować jako prąd trójfazowego sterowanego źródła prądowego. Schemat równoważnego obwodu elektrycznego dla harmonicznnych prądów rzędu $n \in N_A$ pokazano na rysunku 2.

Prąd i_B (rys. 3), składający się z harmonicznnych, dla których moc czynna P_n jest przekazywana do źródła zasilania $n \in N_B$, „generowany” jest w odbiorniku. W tym przypadku odbiornik może być rozważany jako trójfazowe źródło prądowe, natomiast źródło zasilania – jako pasywny odbiornik. Źródło zasilania zazwyczaj charakteryzuje się znacznie większym poziomem symetrii impedancji w porównaniu do odbiornika.

Rys. 2. Równoważny obwód dla $n \in N_A$ [1]Rys. 3. Równoważny obwód dla $n \in N_B$ [1]

Założono zatem, że dla $n \in N_B$ źródło zasilania traktowane jest jako symetryczny odbiornik o impedancji Z_{en} .

$$Z_{en} = \begin{cases} \frac{-S_n^*}{\|i_n\|^2} = R_{en} + jX_{en}, & \text{dla } n \in N_B \\ 0, & \text{dla } n \in N_A \end{cases} \quad (14)$$

Schemat równoważnego obwodu elektrycznego dla harmonicznych $n \in N_B$ pokazano na rysunku 3. Wartość prądu potrzebna do dostarczenia mocy czynnej P_A do odbiornika przy napięciu u_A , obliczana jest zgodnie z zależnością (15) – wg koncepcji prądu aktywnego Fryzego:

$$i_a = G_e \cdot u_A \quad (15)$$

gdzie:

$$G_e = \frac{P_A}{\|u_A\|^2} \quad (16)$$

G_e oznacza konduktancję fazową rezystancyjnego symetrycznego trójfazowego odbiornika, który jest równoważny z oryginalnym ze względu na wartość dostarczanej do niego mocy czynnej (aktywnej) P_A przy napięciu u_A .

Prąd i_b jest prądem symetrycznego odbiornika o admitancji fazowej \underline{Y}_{en} . Różnica między prądem i_b a prądem i_a jest „bezużyteczną” składową prądu, którą można zapisać jako:

$$i_b - i_a = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N_A} Y_{en} \cdot \underline{U}_{An} e^{jn\omega t} - \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N_A} G_e \cdot \underline{U}_{An} e^{jn\omega t} =$$

$$= \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N_A} (G_{en} + jB_{en} - G_e) \cdot \underline{U}_{An} e^{jn\omega t} = i_s + i_r \quad (17)$$

$$i_s = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N_A} (G_{en} - G_e) \cdot \underline{U}_{An} e^{jn\omega t} \quad (18)$$

$$i_r = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n \in N_A} jB_{en} \cdot \underline{U}_{An} e^{jn\omega t} \quad (19)$$

Składowa i_s jest prądem, który został zdefiniowany przez Czarneckiego i jest nieznaną z wcześniejszych rozkładów. Pojawia się w prądzie i odbiornika wtedy, gdy jego konduktancja dla składowych harmonicznych G_{en} zmienia się z rzędem harmonicznej n wokół konduktancji równoważnej G_e . Prąd i_s został nazwany przez Czarneckiego prądem rozrzutu, natomiast prąd i_r jest prądem biernym – wg koncepcji prądu reaktancyjnego Shepherda i Zakikhani'ego.

Zatem zgodnie z teorią składowych fizycznych prądu, prąd trójfazowego niesymetrycznego nieliniowego odbiornika został rozłożony na pięć składowych:

$$i = i_a + i_s + i_r + i_u + i_B \quad (20)$$

Każda składowa związana jest z innym zjawiskiem energetycznym i jest ortogonalna w stosunku do pozostałych. Zaproponowany przez Czarneckiego rozkład prądu postaci (20) ujawnia pięć odrębnych zjawisk fizycznych, decydujących o wartości prądu i odbiornika – przedstawionych we wnioskach niniejszego artykułu.

3. ALGORYTM STEROWANIA OPARTY NA TEORII SKŁADOWYCH FIZYCZNYCH PRĄDU – TSFP

Teoria mocy składowych fizycznych prądu została opracowana w dziedzinie częstotliwości. Zastosowanie sformułowanych przez nią zależności wymaga znajomości wartości zespolonych harmonicznych \underline{U}_n i \underline{I}_n , występujących w mierzonych sygnałach napięć i prądów. Zatem algorytm sterowania bazujący na TSFP w pierwszej kolejności dokonuje analizy harmonicznych przebiegów napięcia zasilającego u_s i prądu odbiornika i_L . Na zbiorze wyznaczonych zespolonych wartości harmonicznych wykonywany jest szereg operacji, pozwalających na obliczenie prądów składowych (20) i wypracowanie prądu referencyjnego. Ogólny schemat blokowy przedmiotowego algorytmu ste-

rowania przedstawiono na rysunku 4. Można w nim wyróżnić następujące operacje:

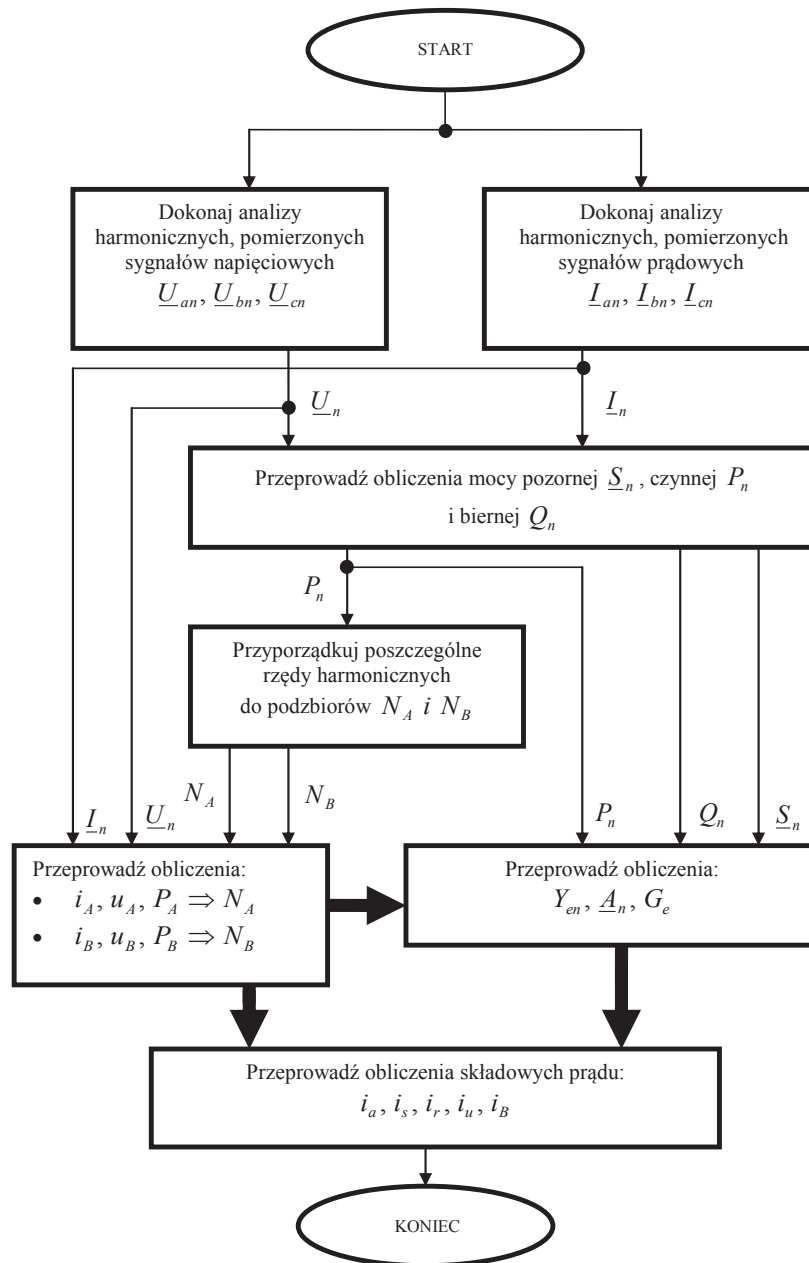
- analizę harmonicznych mierzonych sygnałów napięcia i prądu – wyznaczenie wartości zespolonych harmonicznych \underline{U}_n i \underline{I}_n ;
- obliczenie mocy pozornej \underline{S}_n , czynnej P_n i biernej Q_n (3);
- przyporządkowanie poszczególnych rzędów harmonicznych do podzbiorów N_A i N_B , zgodnie z zależnością (4);
- wyznaczenie wielkości i_A, u_A, P_A , przynależnych do zbioru N_A , oraz i_B, u_B, P_B , przynależnych do zbioru N_B , z wykorzystaniem zależności (5), (6) i (7);
- obliczenie parametrów obwodów zastępczych: admitancji równoważnej Y_{en} (8), admitancji nierównoważenia \underline{A}_n (12) oraz konduktancji G_e (16);
- obliczenie składowych prądu odbiornika: i_a (15), i_s (18), i_r (19), i_u (13), i_B (5).

4. BADANIA SYMULACYJNE KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ W OPARCIU O TEORIĘ SKŁADOWYCH FIZYCZNYCH PRĄDU – TSFP

Symulacja komputerowa objęła następujące układy [2]:

- kompensację mocy, zrealizowaną w oparciu o teorię TSFP, dla sieci trójfazowej obciążonej obwodem typu R, L;
- kompensację mocy, zrealizowaną w oparciu o teorię TSFP, dla sieci trójfazowej obciążonej mostkiem prostowniczym diodowym, 6-pulsowym;
- kompensację mocy, zrealizowaną w oparciu o teorię TSFP, dla sieci trójfazowej obciążonej mostkiem prostowniczym tyrystorowym, 6-pulsowym.

Narzędziem wykorzystanym do budowy poszczególnych modeli kompensacji mocy biernej był pakiet SIMULINK, wchodzący w skład programu MATLAB, pracującego w środowisku WINDOWS. W częściach silnoprądowych modeli użyto bloku narzędziowego „Power System Blockset”, wchodzącego w skład narzędzi SIMULINK-a, zwanego „Blocksets & Toolboxes”. Poszczególne układy sterowania zbudowano z elementów statycznych i dynamicznych, pochodzących z wbudowanych bibliotek SIMULINK-a. Skorzystano również z możliwości definiowania własnych bloków poprzez łączenie i grupowanie elementów już istniejących (tworzenie podsistemów).



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu sterowania opartego na teorii TSFP – Czarnieckiego [1]

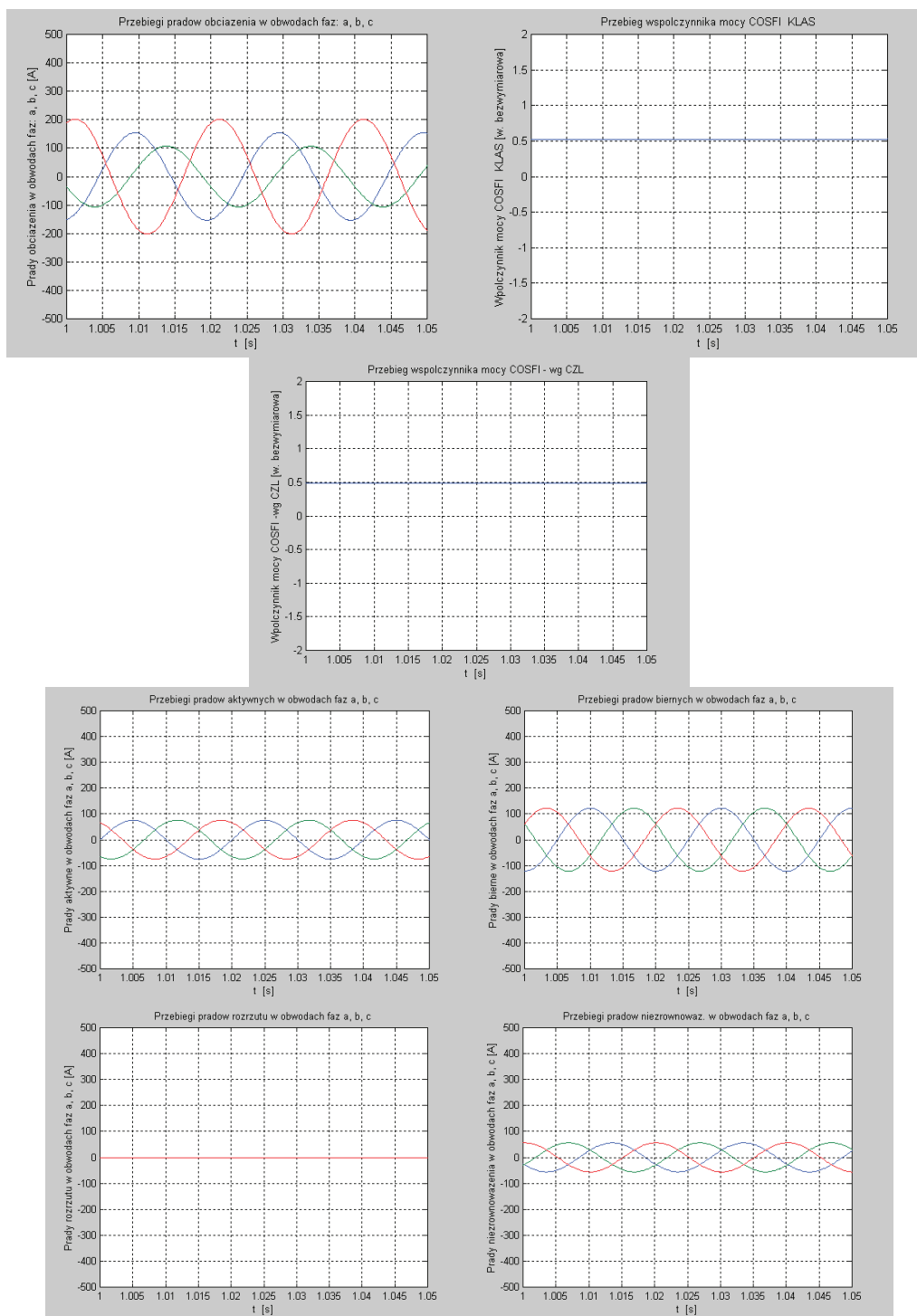
Badania symulacyjne modeli przeprowadzono dla następujących danych znamionowych:

- sieć trójfazowa trójprzewodowa:
 - napięcie sieci: 3×400 [V];
 - częstotliwość: 50 [Hz];
 - rodzaj sieci: sztywne ($R_S = 0$ [Ω], $L_S = 0$ [H]);
- obwód obciążenia typu R, L :
 - $R = 1; 2$ [Ω];
 - $L = 0; 1; 10$ [mH];
 - rodzaj obciążenia: symetryczne i niesymetryczne;
- obwód obciążenia: trójfazowy mostek prostokątny (diodowy), 6-pulsowy; obciążenie mostka prostokątnego, obwód R_o, L_o o parametrach:
 - $R_o = 2$ [Ω];
 - $L_o = 10$ [mH];
- obwód obciążenia: trójfazowy mostek prostokątny (tyrystorowy), 6-pulsowy; obciążenie mostka prostokątnego, obwód R_o, L_o o parametrach:
 - $R_o = 2$ [Ω];
 - $L_o = 10$ [mH];
- regulatory prądu (dla wygenerowania prądu dodatkowego) dla każdej z faz (a, b, c):
 - rodzaj regulatora: proporcjonalno-całkujący (typ PI);
 - współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego: $K_p = 1$ [wielkość bezwymiarowa];
 - czas zdwojenia członu całkującego: $T_z = 0,5$ [s];
- rodzaj zastosowanego falownika w części silnopiędowej (do generowania prądu dodatkowego): idealny trójfazowy falownik prądowy.

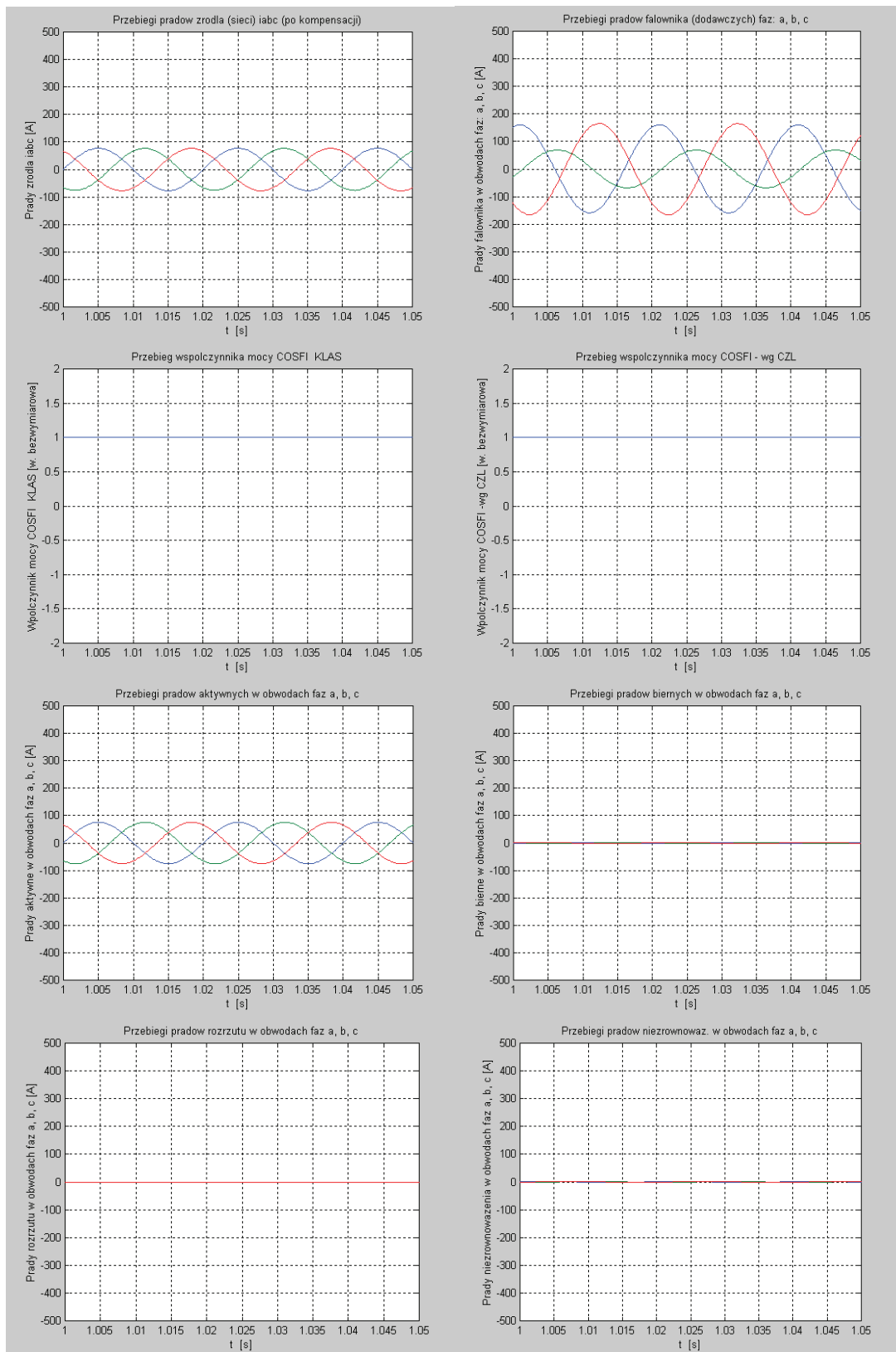
4.1. Wybrane przebiegi czasowe z przeprowadzonych badań symulacyjnych

Poniżej przedstawiono przebiegi charakterystycznych wielkości uzyskane w procesie symulacji dla różnych obciążeń układu zasilającego w otwartym

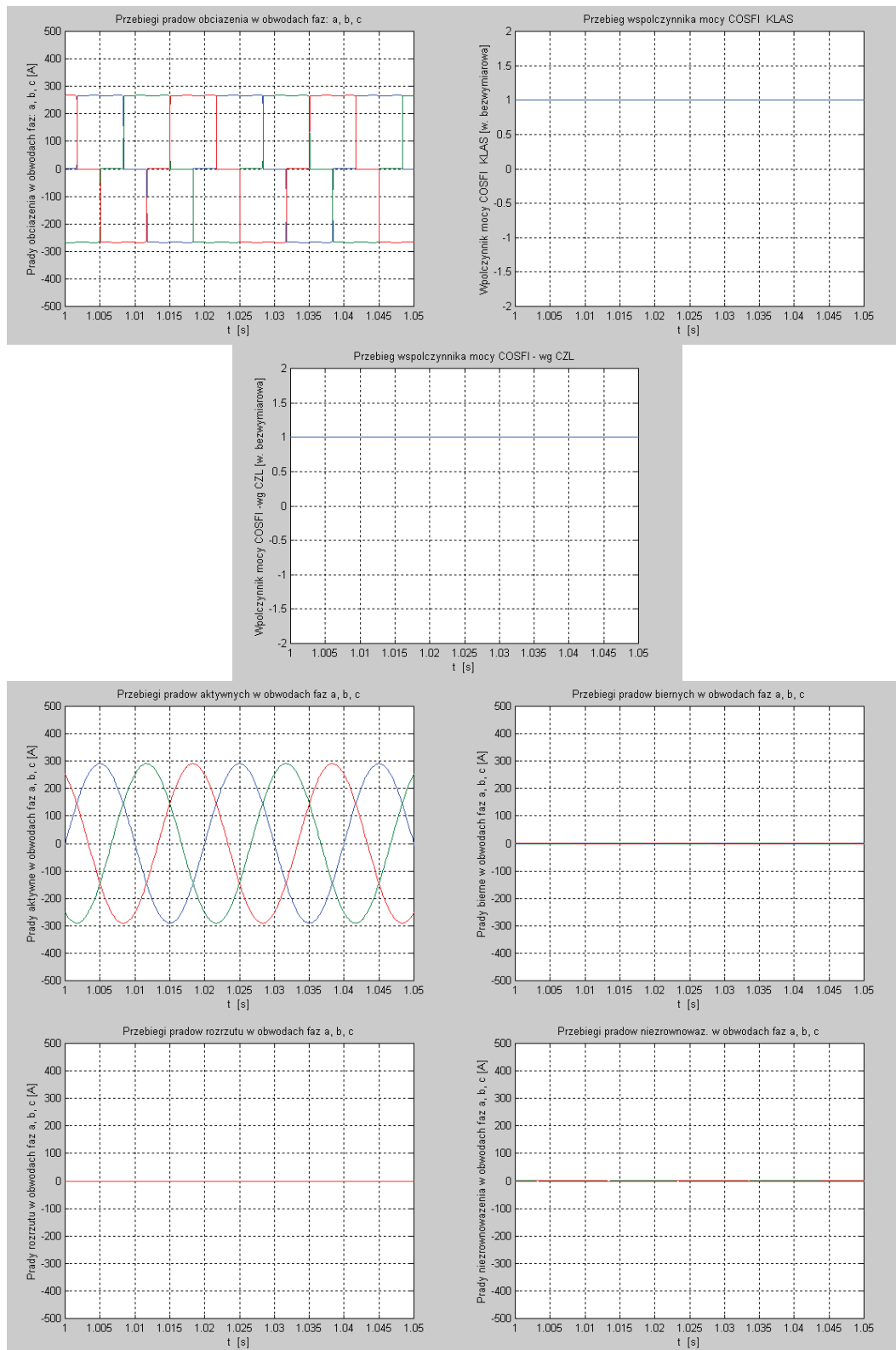
(rys. 5.1, 6.1, 7.1) i zamkniętym (rys. 5.2, 6.2, 7.2) układzie regulacji (z załączonym filtrem aktywnym) [2, 3].



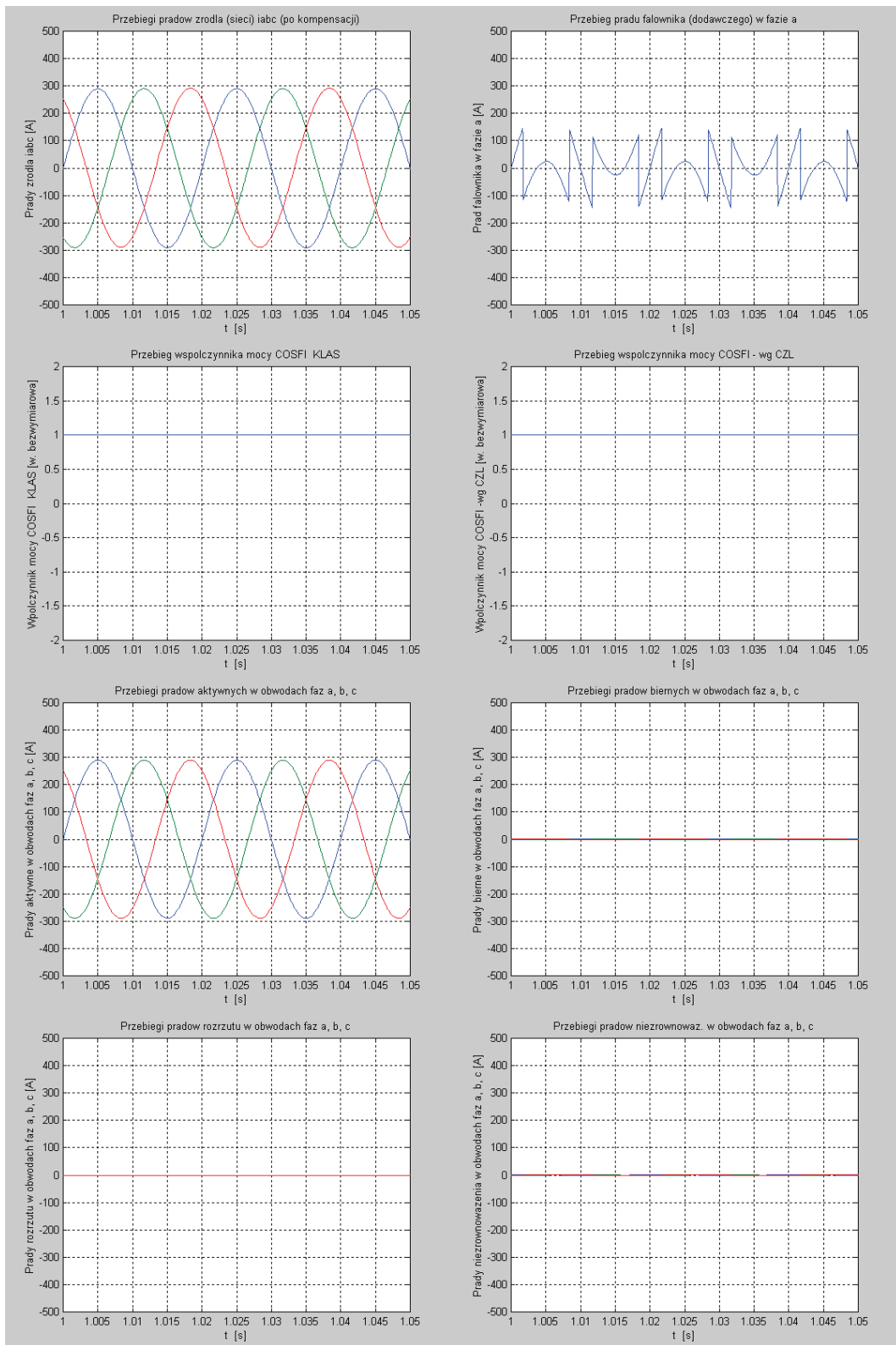
Rys. 5.1. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości fizycznych, uzyskane w procesie symulacji kompensacji mocy biernej, zrealizowanej w oparciu o teorię mocy TSFP, w układzie otwartym regulacji, dla sztywnej sieci trójfazowej, trójprzewodowej, obciążonej obwodem typu R, L – dla przypadku: obciążenie niesymetryczne dla $R_{oa} = R_{ob} = R_{oc} = 1 [\Omega]$, $L_{oa} = L_{ob} = 10 [mH]$, $L_{oc} = 1 [mH]$



Rys. 5.2. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości fizycznych, uzyskane w procesie symulacji kompensacji mocy biernej, zrealizowanej w oparciu o teorię mocy TSFP, w układzie zamkniętym regulacji, dla sztywnej sieci trójfazowej, trójprzewodowej, obciążonej obwodem typu R, L – dla przypadku: obciążenie niesymetryczne dla $R_{oa} = R_{ob} = R_{oc} = 1 [\Omega]$, $L_{oa} = L_{ob} = 10 [mH]$, $L_{oc} = 1 [mH]$

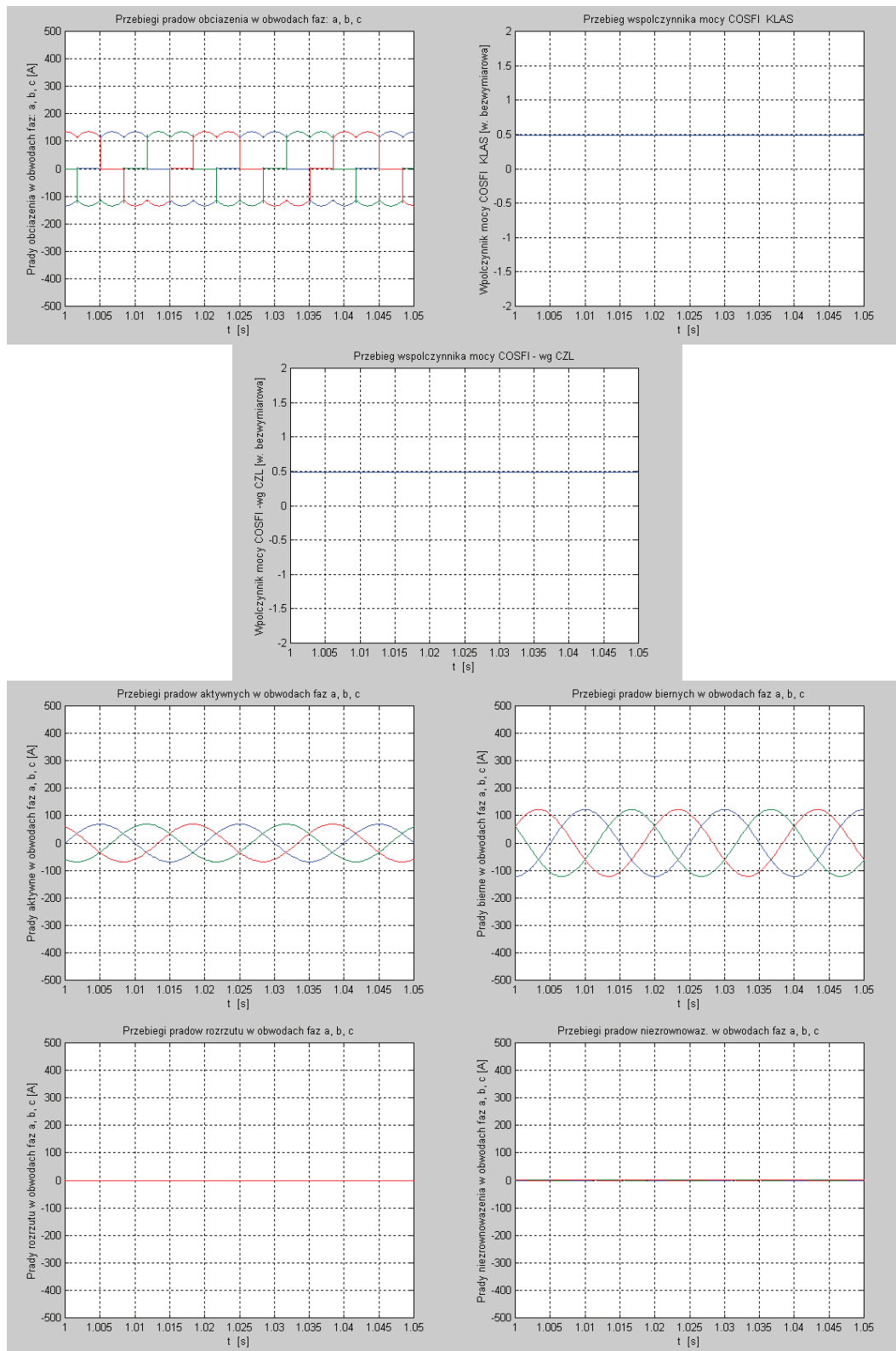


Rys. 6.1. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości fizycznych, uzyskane w procesie symulacji kompensacji mocy biernej, zrealizowanej w oparciu o teorię mocy TSFP, w układzie otwartym regulacji, dla sztywnej sieci trójfazowej, trójprzewodowej, obciążonej trójfazowym mostkiem prostowniczym (diodowym), 6-pulsowym – dla przypadku: obciążenie mostka prostowniczego typu impedancyjnego: $R_o = 2 [\Omega]$, $L_o = 10 [mH]$

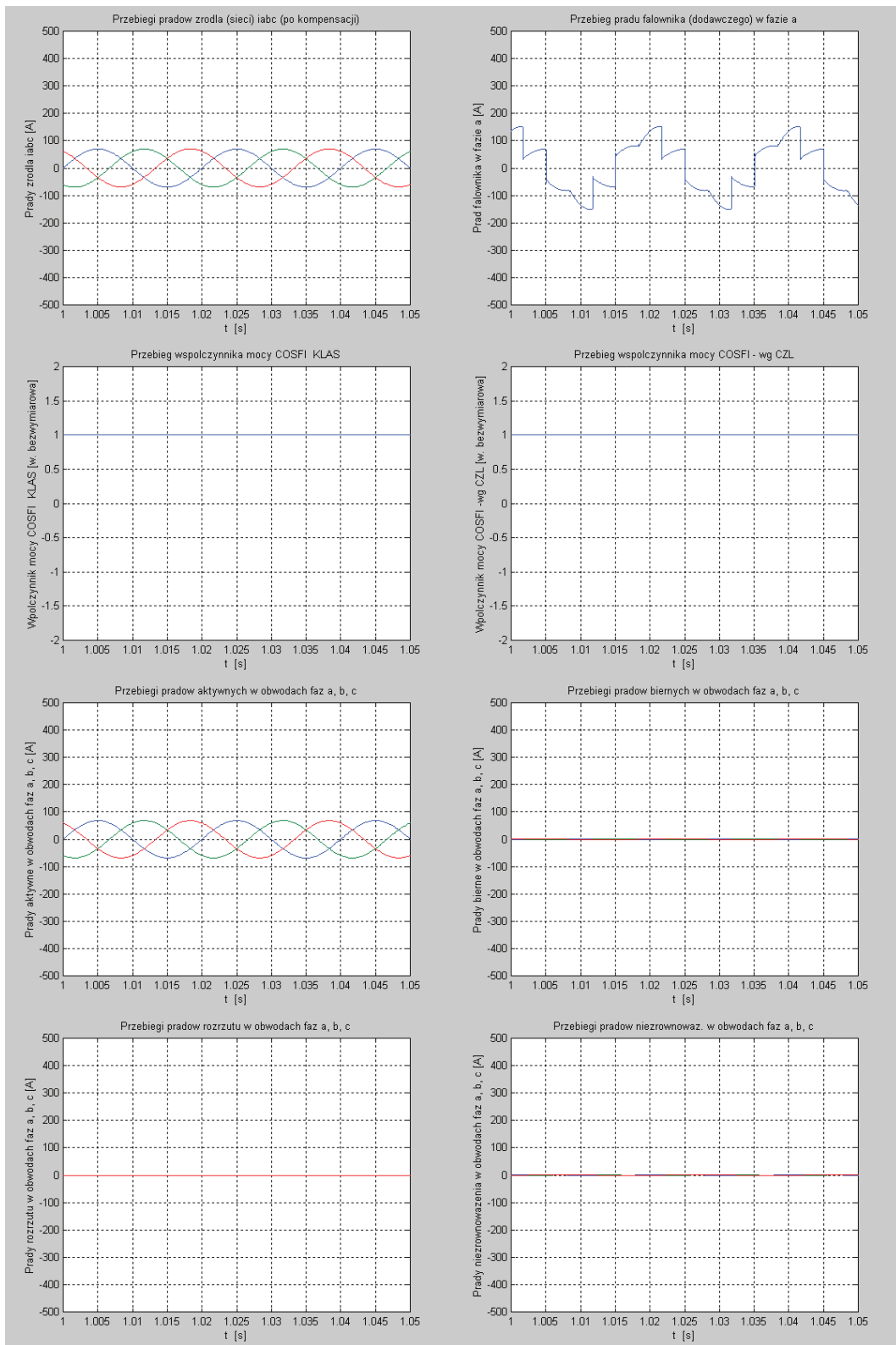


Rys. 6.2. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości fizycznych, uzyskane w procesie symulacji kompensacji mocy biernej, zrealizowanej w oparciu o teorię mocy TSFP, w układzie zamkniętym regulacji, dla sztywnej sieci trójfazowej, trójprzewodowej, obciążonej trójfazowym mostkiem prostowniczym (diodowym), 6-pulsowym – dla przypadku: obciążenie mostka prostowniczego typu impedancyjnego:

$$R_o = 2 [\Omega], L_o = 10 [mH]$$



Rys. 7.1. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości fizycznych, uzyskane w procesie symulacji kompensacji mocy biernej, zrealizowanej w oparciu o teorię mocy TSFP, w układzie otwartym regulacji, dla sztywnej sieci trójfazowej, trójprzewodowej, obciążonej trójfazowym mostkiem prostowniczym (tyrystorowym), 6-pulsowym – dla przypadku: kąt opóźnienia wysterowania zaworów: $\alpha = 60^\circ$ [deg], obciążenie mostka prostowniczego typu impedancyjnego: $R_o = 2$ [Ω], $L_o = 10$ [mH]



Rys. 7.2. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości fizycznych, uzyskane w procesie symulacji kompensacji mocy biernej, zrealizowanej w oparciu o teorię mocy TSFP, w układzie zamkniętym regulacji, dla sztywnej sieci trójfazowej, trójprzewodowej, obciążonej trójfazowym mostkiem prostowniczym (tj. tyrystorowym), 6-pulsowym – dla przypadku: kąt opóźnienia wysterowania zaworów: $\alpha = 60^\circ$ [deg], obciążenie mostka prostowniczego typu impedancyjnego: $R_o = 2$ [Ω], $L_o = 10$ [mH]

5. WNIOSKI

Teoria mocy bazująca na teorii składowych fizycznych prądów – *TSFP* (zwana również teorią mocy Czarneckiego) została opracowana w dziedzinie częstotliwości. Biorąc z teorii mocy Fryzego koncepcję prądu czynnego, z teorii Shepherd'a i Zikikhaniego koncepcję prądu biernego oraz wprowadzając nową składową, nazwaną prądem rozrzutu, Czarnecki zaproponował ortogonalny rozkład prądu źródła zasilającego jednofazowy odbiornik liniowy. Początkowo teoria ta dotyczyła jedynie systemów jednofazowych, jednak rozwijana stopniowo, rozszerzona została na systemy trójfazowe. Teoria umożliwia fizyczną interpretację zjawisk energetycznych, zachodzących w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów oraz w warunkach asymetrii prądów odbiornika oraz asymetrii napięć zasilających. Poza celami poznawczymi teoria ta umożliwia również realizację celów praktycznych, prowadzących do poprawy współczynnika mocy.

Modele symulacyjne do analizy obwodów trójfazowych, zbudowane w oparciu o teorię *TSFP* w MATLAB-ie/SIMULINK-u, pozwalają w łatwy sposób zmieniać parametry źródła zasilania, toru przesyłowego i odbioru.

Zaproponowany przez Czarneckiego w teorii *TSFP* rozkład prądu ujawnia pięć odrębnych zjawisk fizycznych, decydujących o wartości prądu odbiornika i , a mianowicie:

- przepływ energii ze źródła zasilania do odbiornika, istniejący wtedy, gdy odbiornik ma niezerową moc czynną P_A ($n \in N_A$) – wymaga on przepływu prądu czynnego (aktywnego) i_a (transmisja mocy czynnej do odbiornika);
- zmiana konduktancji odbiornika G_{en} wraz z rzędem n harmonicznym, powoduje pojawienie się prądu rozrzutu i_s – prąd ten nie uczestniczy w przepływie energii ze źródła zasilania do odbiornika;
- przesunięcie fazowe harmonicznym prądu względem harmonicznym napięcia, pojawiające się wtedy, gdy odbiornik ma niezerową susceptancję B_n dla częstotliwości harmonicznym – przesunięcie to powoduje pojawienie się prądu biernego i_r , który nie uczestniczy w przenoszeniu energii ze źródła zasilania do odbiornika;
- nierównoważenie odbiornika, powodujące pojawienie się prądu nierównoważenia i_u , występuje tylko w systemach trójfazowych, gdy odbiornik ma niezerową admitancję nierównoważenia A_n – prąd ten nie bierze udziału w przenoszeniu energii ze źródła zasilania do odbiornika;

– przepływ energii z odbiornika do źródła zasilania, istniejący wtedy, gdy odbiornik ma niezerową moc czynną P_B ($n \in N_B$) – wymaga on przepływu prądu „generowanego” i_b (transmisja mocy czynnej z odbiornika do źródła zasilania).

Opracowany algorytm sterowania kompensacją mocy biernej pozwala w procesie symulacji na całkowitą eliminację mocy biernej w obwodzie i przepływu prądów wyższych harmonicznym oraz symetryzację prądów odbiornika.

Możliwość pakietu MATLAB/SIMULINK oraz bloku narzędziowego „Power System Blockset” są wystarczające, z praktycznego punktu widzenia, do prowadzenia symulacji układów sterowania w oparciu o teorię mocy *TSFP*.

Literatura

1. Czarnecki L.: *Dynamic, power quality oriented approach to theory and compensation of asymmetrical systems under nonsinusoidal conditions*, Europ. Trans. Electr. Power, 5, ETEP 1994, p. 347-358.
2. Wosik J., Kalus M.: *Przeprowadzenie badań symulacyjnych EFA – Etap 3*, Praca badawcza, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice – kwiecień 2011 [niepublikowana].
3. Wosik J., Kalus M., Miedziński B.: *Badania symulacyjne efektywności kompensacji mocy biernej odbiorów nieliniowych w oparciu o teorię mocy chwilowej*, Mechanizacja i Automatyza-cja Górnictwa, 2011, nr 7 (485), s. 35-44.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów