

Marek Gołębiowski  
Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

## OPTYMALNE STEROWANIE KILKU FALOWNIKÓW PRZY ICH RÓWNOLEGŁEJ PRACY NA SIEĆ AUTONOMICZNA

### OPTIMAL CONTROLLING OF THE SEVERAL INVERTERS DURING THEIR PARALLEL OPERATION FOR AUTONOMOUS GRID

**Abstract:** Cooperation of the several inverters systems differing in parameters were considered. All inverters are connected to the common load. The load is impedance of the inductance type in star layout. Parallel with the star of load, the star of capacity is connected. The goal of the circuit is to create the symmetric layout of the 3-phase voltages at the load, which is asymmetric and can have impulse characteristic. The measurements of the voltages in autonomous grid at real object and measurements of the currents flowing from every circuit to the load were taken. The controlled magnitude are currents flowing from the inverters for which the optimal value is calculated. We need to take into account the limitation of maximum allowed value of this current. The system of inverters, connected parallel, can have tendency to oscillation. It manifests by presence of the higher ripples in inverters currents. These pulsations actually compensate each other, they are not noticeable at the load site and give needed load current. This phenomenon is a kind of resonance pulsation, it consists of transferring the power (even negative) between individual inverters and that is why it is very bad.

#### 1. Wstęp

Rozważono współpracę kilku układów falowników, różniących się między sobą parametrami. Wszystkie falowniki podłączone są do wspólnego obciążenia. Jest nim gwiazda impedancji typu indukcyjnego. Równoległe z gwiazdą obciążenia przyłączona jest gwiazda pojemności. Zadaniem układu jest wytworzenie układu symetrycznych napięć trójfazowych na obciążeniu, które jest niesymetryczne oraz może mieć charakter impulsowy.

Przyjęto pomiary na obiekcie rzeczywistym napięcia na autonomicznej sieci oraz prądów wpływających z każdego układu do obciążenia. Wielkością sterowaną są prądy wpływające z falowników, dla których oblicza się wartość optymalną. Należy uwzględnić ograniczenie w postaci maksymalnej dopuszczalnej wartości tego prądu.

Układ falowników, połączonych równoległe, może wykazywać skłonność do drgań. Przejawia się to w występowaniu wyższych pulsacji prądów falowników. Pulsacje te w sumie znoszą się, nie są widoczne ze strony obciążenia i dają potrzebny prąd obciążenia. Zjawisko to ma charakter drgań rezonansowych, polega na przekazywaniu mocy (nawet ujemnej) między poszczególnymi falownikami i dlatego jest jednak bardzo szkodliwe. Sposobem uniknięcia drgań jest np. powiększenie indukcyjności dołączonej do wyjść falowników.

#### 2. Równania układu falownika

Układ falownika z rys. 1 ma współpracować z siecią energetyczną. Jest ona przedstawiona jako szeregowe połączenie rezystancji  $R_a$  ( $R_b$ ,  $R_c$ ), indukcyjności  $L_a$  ( $L_b$ ,  $L_c$ ) oraz napięcia źródłowego  $e_a$  ( $e_b$ ,  $e_c$ ) w każdej z faz sieci. Częścią składową układu jest transformator, który dostosowuje napięcie kondensatora  $V_{dc}$  poprzez działanie falownika do wielkości napięcia sieci. Rozważany układ (rys. 1) składa się z falownika, który przez trzy niesprzężone dławiki  $L_i$  zasila kondensatory  $C_i$  połączone w trójkąt. Do tych kondensatorów podłączony jest transformator w układzie  $\Delta/Y$  o przekładni  $\zeta = z_s / z_t$ . Strona wtórna tego transformatora to gwiazda z przewodem zerowym. Podłączone do niej są kondensatory  $C_o$ , tworzące układ gwiazdowy. Napięcie na nich:  $V_o$  to napięcie wyjścia, a prąd  $I_o$  to prąd obciążenia. Do opisu układu wykorzystuje się macierz  $[K]$ :

$$[K] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Macierz ta przekształca np. trójfazowy układ napięć wyjściowych  $[V_{oa}, V_{ob}, V_{oc}]^T$  w prostokątny układ  $[V_{o\alpha}, V_{o\beta}, V_{o0}]^T$ , według zależności:

$$\begin{bmatrix} V_{o\alpha} \\ V_{o\beta} \\ V_{o0} \end{bmatrix} = [K] \cdot \begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = [K]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{o\alpha} \\ V_{o\beta} \\ V_{o0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Wykorzystywana jest też macierz  $[T]$ , która pozwala na przeliczanie wielkości wejściowych i wyjściowych w transformatorze:

$$[T] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}; [It] = \zeta \cdot [T] \cdot [Is] \quad (3)$$

$$[Vo] = \zeta \cdot [T]^T \cdot [Vi]$$

gdzie:  $[It]$  to prądy przewodowe strony pierwotnej transformatora,  $[Is]$  to prądy fazowe strony wtórnej transformatora,  $[Vi]$  to napięcia fazowe strony pierwotnej,  $[Vo]$  to napięcia strony wtórnej transformatora, a  $\zeta = z_s / z_t$  to przekładnia transformatora.

Równania ciągłe, które opisują przedstawiony układ przedstawiają się następująco:

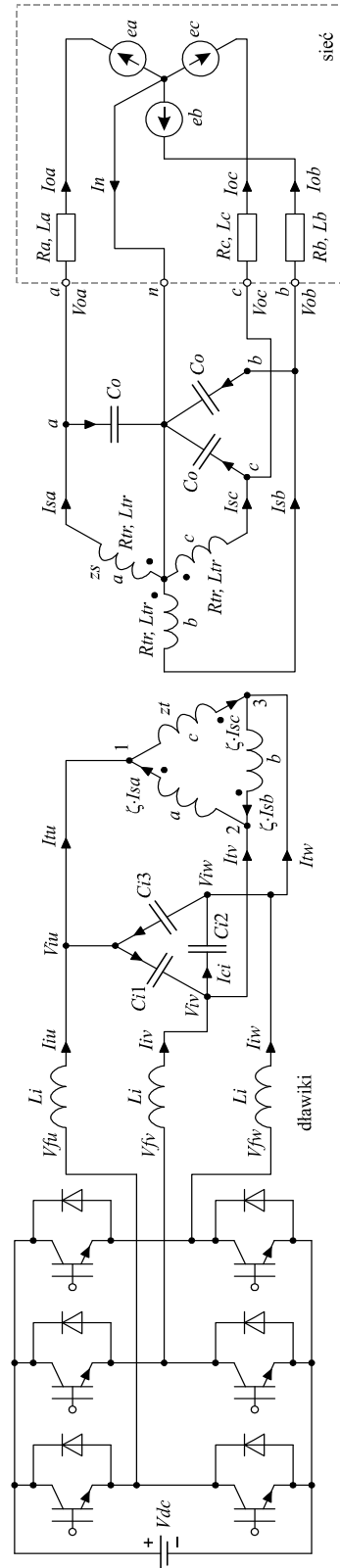
$$\begin{cases} 1-2: & \frac{d}{dt}[Vi] = \{[It] - \zeta \cdot [T] \cdot [Is]\} / (3 \cdot C_i) \\ 3-4: & \frac{d}{dt}[It] = \{[Vf] - [Vi]\} / L_i \\ 5-7: & \frac{d}{dt}[Vo] = \{[Is] - [Io]\} / C_o \\ 8-10: & \frac{d}{dt}[Is] = \{\zeta \cdot [T]^T \cdot [Vi] - [Vo] - R_t \cdot [Is]\} / L_t \\ 11-13: & \frac{d}{dt}[Io] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} \end{bmatrix} \cdot \left\{ [Vo] - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot [Io] - \begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

Prądy dławików  $[Ii]$ , prądy pierwotne  $[It]$  transformatora, czy też napięcia wyjściowe falownika  $[Vf]$  nie mają składowej zerowej. Przyczyną jest brak przewodu zerowego na wyjściu falownika. Dlatego równania na pochodne napięć  $[Vi]$  oraz prądów dławików  $[Ii]$  są rozpatrywane tylko dla składowych  $\alpha$  i  $\beta$ . W związku z tym równania te są mnożone z lewej strony przez macierz  $[K]$  (1) i brane są pod uwagę tylko równania na te składowe  $\alpha$  i  $\beta$  – trzecia składowa zerowa jest odrzucana. Natomiast w równaniu na pochodne prądów wtórnych transformatora  $[Is]$ , potrzebne składowe fazowe napięć  $[Vi]$  są odtwarzane ze składowych  $\alpha, \beta$ , przy czym składowa zerowa ( $V_{i0} = 0$ ) przyjmowana jest za zero. Parametry  $R_t$  i  $L_t$  to rezystancja i indukcyjność rozproszeniowa wzdłużna zastępcza transformatora w przeliczeniu na jego stronę wtórną. W związku z tym przyjęto następujący wektor zmiennych stanu (rzęd  $n$  równa się  $n = 13$ ):

$$\bar{x} = [Vi\alpha, Vi\beta, Ii\alpha, Ii\beta, Voa, Vob, Voc, Isa, Isb, Isc, Ioa, Iob, Ioc]^T$$

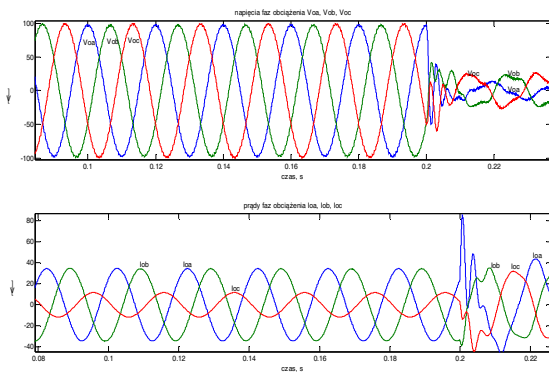
nr: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

(5)



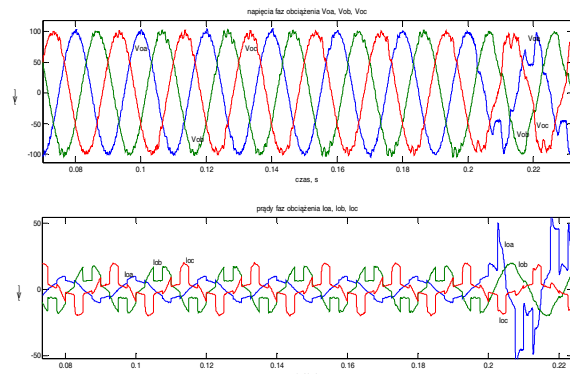
Rys. 1. Układ falownika do pracy na sieć (sztywną) systemu energetycznego [2, 3, 4]

Podczas obliczeń, korzystając z wartości prądów i napięć każdej fazy, była estymowana, z dużą dokładnością wartość parametrów R, L każdej fazy. Wykorzystywano w tym celu równanie napięciowe każdej fazy, tworząc nadokreślone (przykładowo z okresu  $133e-6$  s wstecz) równanie względem parametrów R, L. Przyjęto, że po czasie  $t_{wl\_est\_odb} = 0,1$  s mogły zostać uwzględniane dokładniejsze wartości estymowane obciążenia R, L każdej fazy. Wówczas na nowo trzeba było obliczyć dokładniejszą wartość macierzy sterującej  $[K_{st}]$ . Okazało się jednak, że estymacyjne udoładnienie parametrów obciążenia, przy przyjętym schemacie obliczeniowym nie miało większego wpływu na dokładność obliczeń optymalizacyjnych. Sterowanie dobrze spełniało swe zadanie nawet przy bardzo niedokładnych parametrach obciążenia.

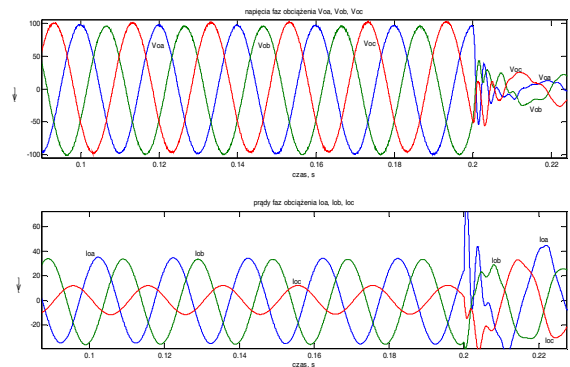


Rys. 2. Napięcia i prądy faz ciągłego niesymetrycznego trójfazowego obciążenia AC przy pełnych pomiarach w układzie rzeczywistym - do czasu 0,1 s równanie bez estymacyjnej poprawy parametrów obciążenia; od 0,2 s za duże niesymetryczne obciążenie (od 0,1 s następuje estymacyjna poprawa parametrów obciążenia)

Na rysunku 2 widać działanie zabezpieczające układ przed przeciążeniem prądowym. Nie dopuszcza ono, nawet za cenę odkształconych napięć wyjściowych do przekroczenia prądu dławików  $[I_i]$  (po zbyt dużym obciążeniu układu w chwili 0,2 s).



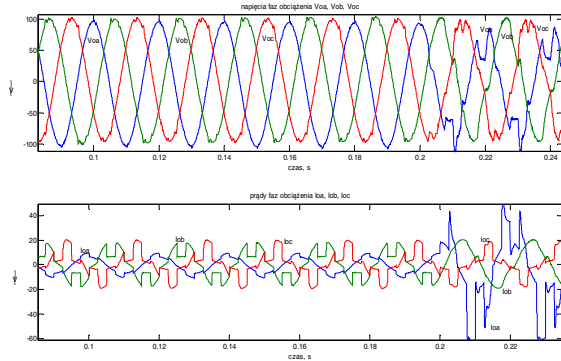
Rys. 3. Napięcia i prądy faz przy impulsowym trójfazowym, niesymetrycznym obciążeniu AC przy pełnych pomiarach w układzie rzeczywistym – do czasu 0,1 s równanie bez estymacyjnej poprawy na bieżąco parametrów obciążenia, od 0,2 s za duże niesymetryczne obciążenie (od 0,1 s następuje estymacyjna poprawa parametrów obciążenia)



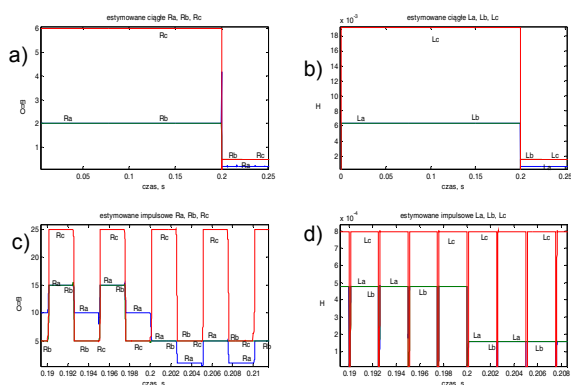
Rys. 4. Napięcia i prądy faz ciągłego, trójfazowego, niesymetrycznego obciążenia AC (jak na rysunku 2), lecz przy niepełnych pomiarach tylko napięcia  $[\vec{v}_o]$  faz obciążenia oraz prądów faz obciążenia  $[\vec{i}_o]$

Na rysunku 5 przedstawiono podobny sposób pracy układu sterowania, też przy niepełnych pomiarach zmiennych stanu  $\vec{x}$ , lecz przy impulsowym obciążeniu, co odpowiada rysunkowi 3.

Do estymacji rezystancji i indukcyjności obciążenia tworzono nadokreślony układ równań, w którym niewiadomymi były te parametry. Na rysunku 6 przedstawiono otrzymane estymacje parametrów obciążenia, które dokładnie odpowiadają zastosowanym obciążeniom.



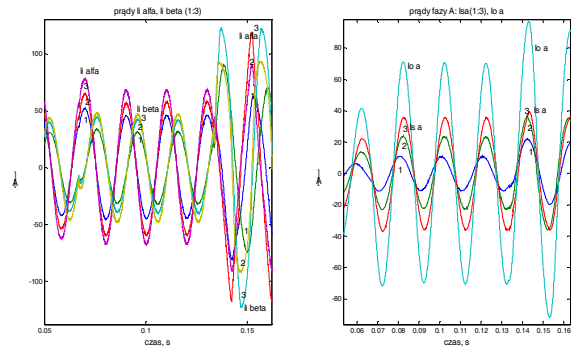
Rys. 5. Napięcie i prądy fazowe przy impulsowym, trójfazowym, niesymetrycznym obciążeniu AC jak na rysunku 3, przy niepełnych pomiarach tylko napięcia  $[\bar{V}_o]$  faz obciążenia oraz prądy faz obciążenia  $[\bar{I}_o]$



Rys. 6. Estymacje rezystancji i indukcyjności obciążenia, które odzwierciedlały zastosowane parametry  $R, L$ ; a) estymacja rezystancji  $R_a, R_b, R_c$  przy ciągłym obciążeniu; b) estymacja indukcyjności  $L_a, L_b, L_c$  przy ciągłym obciążeniu; c) estymacja rezystancji  $R_a, R_b, R_c$  przy impulsowym obciążeniu; d) estymacja indukcyjności  $L_a, L_b, L_c$  przy impulsowym obciążeniu

Jak widać z zamieszczonych rysunków, estymacje parametrów obciążenia nie miały decydującego znaczenia na poprawność optymalizacji sterowania, zarówno przy pełnym pomiarze wektora zmiennych stanu  $\bar{x}$  lub też przy niepełnym jego pomiarze.

Współpracę trzech falowników przy tworzeniu sieci autonomicznej prezentuje rysunek 7.



Rys. 7. Przebiegi składowych alfa i beta prądów indukcyjności  $L_i$  ( $I_i$ ) oraz prądów fazy  $a$  wypływających z transformatorów  $tr$  ( $I_s$ ) przy obciążeniu ciągłym przy równoległej współpracy 3 falowników, jak też prądu fazy  $a$  obciążenia  $I_{o\_a}$

### 3. Wnioski

Z przedstawionych rozważań i symulacji można wyciągnąć wniosek, że opisana metoda optymalnego sterowania falownikiem sprawdza się przy jego samodzielnej (autonomicznej) pracy w układzie z rysunku 1. Układ spełniał założenia projektowe pomimo tego, że podczas sterowania były użyte tylko jego przybliżone parametry. Okazał się też mało wrażliwy na parametry obciążenia, znane z bardzo dużą niedokładnością lub też zmieniane w sposób impulsowy. Pomimo tego opracowano sposób bieżącej estymacji parametrów obciążenia. Podczas każdej poprawy parametrów obciążenia było konieczne też obliczenie na nowo macierzy sterowania. Przedstawiono ciekawy sposób generacji sinusoidalnego napięcia wzorcowego podstawowej harmonicznej dla pracy autonomicznej. Na podobnej zasadzie działa też wydzielenie harmonicznych z napięcia obciążenia. Umieszczenie ich w funkcji jakości umożliwia ich usuwanie. W dobie rozwoju energoelektroniki można układ powyższy uznać za silną konkurencję dotychczas stosowanych metod PWM, histerezowej czy wektorowej.

Przy pomocy przedstawionej metody można też sterować współpracą kilku falowników na tworzoną przez nie sieć autonomiczną. Również ciekawe są wyniki sterowania optymalnego przy podłączeniu układu falownika do sieci energetycznej. Wówczas zadaje się prąd podstawowej harmonicznej, który ma być do tej sieci wysyłany, zarówno co do modułu, jak i fazy. Równocześnie układ ma starać się, w miarę swoich możliwości, zmniejszyć

wyższe harmoniczne w napięciu sieci, poprzez wysyłanie do niej odpowiednich prądów.

#### 4. Literatura

- [1]. Gołębiowski L., Gołębiowski M.: *Obwody elektryczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- [2]. Gołębiowski L. , Kulig S. T.: *Metody numeryczne w technice*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.
- [3]. Gołębiowski L. , Lewicki J.: *Układy elektromagnetyczne w energoelektronice*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.

[4]. Keyhani A., Marwali M., Dai M.: *Integration of green and renewable energy in electric power systems*, John Wiley & Sons, 2010.

[5]. Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika*, WNT, Warszawa 1994.

#### Autorzy

Dr inż. Marek Gołębiowski, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, B206, 35-959 Rzeszów, e-mail: yegolebi@prz.edu.pl.