

Wiktor BOLEK

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW

Nieliniowy regulator dla turbiny parowej dużej mocy*

dr inż. Wiktor BOLEK

W 1989 r. ukończył studia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym, a w 1991 r. na Wydziale Informatyki i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej. W 1994 r. obronił doktorat w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów PWr. Od tego roku jest adiunktem w Zakładzie Automatykacji Procesów Energetycznych w tymże Instytucie. Zajmuje się syntezą nieliniowych układów regulacji.



Streszczenie

W niniejszym artykule zaproponowano syntezę nieliniowego układu regulacji mocy turbiny, który wykorzystuje jednocześnie dwa zawory: wysokoprężny i niskoprężny. Synteza jest oparta na linearyzacji przez sprzężenie zwrotne. Przeprowadzono eksperymenty symulacyjne, w których porównano proponowany układ regulacji z układami standardowymi. Nieliniowy układ regulacji wykazuje swoją wyższość w szerokim zakresie zmian mocy. Wynika to z precyzyjnego, zgodnego z zależnościami analitycznymi, wykorzystania zaworu niskoprężnego.

Abstract

A non-linear controller for a large steam turbine is proposed in this paper. Both valves (high-pressure and low pressure) are used simultaneously in the control. The controller is synthesised based on direct feedback linearization technique. The proposed and standard control systems were compared in simulation experiments. The non-linear control system is better in a broad range of generated power. This is caused by the precise usage of low-pressure valve – according to the analytical relations.

WSTĘP

We współczesnych połączonych systemach elektroenergetycznych zmiany częstotliwości są bardzo małe w stanach normalnej pracy. Zadanie regulacji wtórnej sprowadza się do utrzymywania zadanej wartości mocy. Im szybciej dany blok jest w stanie dostosować się do żądanych zmian mocy, tym częściej jest wykorzystywany przez Krajową Dyspozycję Mocy, co poprawia rentowność elektrowni [4, 9].

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję jednoczesnego wykorzystania zaworu wysokoprężnego (WP) i niskoprężnego (NP) do regulacji wtórnej turbiny dwustopniowej w celu poprawienia elastyczności pracy bloku. W standardowych rozwiązaniach układ regulacji jest zaprojektowany do sterowania zaworem WP. Natomiast zawór NP jest wykorzystywany jako zawór awaryjny podczas odstawienia turbiny. W niektórych rozwiązaniach stopień otwarcia zaworu NP jest sztywno związany ze stopniem otwarcia zaworu WP przez odcinkami liniową charakterystykę statyczną.

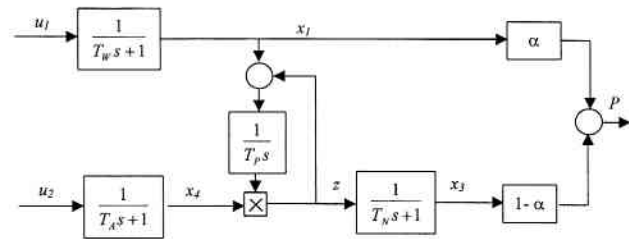
Jednoczesne użycie zaworów WP i NP do regulacji wymaga zastosowania modelu nieliniowego do syntezy układu regulacji. Wyznaczenie odpowiedniego algorytmu regulacji wymaga użycia jednej z metod: 1) zastosowanie przybliżenia liniowego wokół punktu pracy, 2) linearyzując przez sprzężenie zwrotne i nieliniową transformację zmiennych stanu, 3) zastosowanie funkcji sterowania

Lapunowa. Pierwsze, tradycyjne podejście jest słuszne tylko w bliskim otoczeniu nominalnego punktu pracy. W związku z tym nie nadaje się do syntezy algorytmu regulacji w pełnym zakresie zmian mocy. W drugiej z metod, dzięki odpowiedniemu przekształceniu zmiennych stanu model obiektu staje się liniowy w całym zakresie, w którym słuszne jest to przekształcenie [6]. Dla tak zlinearyzowanego obiektu stosuje się standardowy liniowy regulator (np. optymalny z kwadratowym wskaźnikiem jakości). Ta metoda była już wypróbowywana do syntezy algorytmu sterowania napięciem wzbudzenia generatorów [3, 11], a także do stabilizacji systemu generatorów pracujących na wspólnej sieci [10]. W pracach [2, 1] przeanalizowano zastosowanie tej metody do regulacji prędkości obrotowej turbiny. Trzecia metoda polega na znalezieniu odpowiedniej funkcji Lapunowa, która zależy od sygnału sterującego. Następnie sygnał sterujący wyznacza się tak, aby pochodna funkcji Lapunowa była ujemna. Ta metoda jest lepsza w sytuacji, gdy nieliniowy obiekt jest niestabilny i nie można znaleźć linearyzującego sprzężenia zwrotnego [7].

W niniejszym artykule zaproponowano syntezę nieliniowego układu regulacji mocy turbiny przy jednoczesnym wykorzystaniu dwu zaworów, opartą na linearyzacji przez sprzężenie zwrotne. Przeprowadzono eksperymenty symulacyjne, w których porównano proponowany układ regulacji z układami standardowymi.

MODEL OBIEKTU

Model dwustopniowej turbiny parowej przedstawiono w wielu publikacjach np. [5, 8].



Rys. 1. Model turbiny dwustopniowej z przegrzewaczem i dwoma zaworami sterującymi.

Równania opisujące turbinę są następujące:

$$\begin{aligned} T_w \dot{x}_1 &= -x_1 + u_1 \\ T_p \dot{x}_2 &= x_1 - x_2 x_4 \\ T_L \dot{x}_3 &= -x_3 + x_2 x_4 \\ T_A \dot{x}_4 &= -x_4 + u_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$P = \alpha x_1 + (1 - \alpha) x_3 \quad (2)$$

gdzie:

u_1 – sygnał sterujący zaworem WP,

u_2 – sygnał sterujący zaworem NP,

x_1, x_3 – natężenia przepływu odpowiednio w części WP i NP,

x_2 – ciśnienie w przegrzewaczu,

x_4 – stopień otwarcia zaworu NP,

T_w, T_p, T_L, T_A – stałe czasowe odpowiednio części wysokoprężnej, niskoprężnej, przegrzewacza i układu wykonawczego,

P – moc produkowana przez blok

α – ułamek mocy produkowany przez część WP.

* artykuł jest kolejną publikacją rekomendowaną przez Konferencję MMAR – 2000

Wszystkie zmienne stanu przyjmują wartości względne do wartości nominalnych. Model utworzono przyjmując założeniach upraszczające. Kocioł zapewnia wymagany strumień i ciśnienie pary, stała czasowa części wysokoprężnej uwzględnia również inercję układu wykonawczego. Procesy elektromagnetyczne w generatorze są na tyle szybkie, że nie wpływają na wartość wytwarzanej mocy.

SYNTEZA UKŁADU REGULACJI

Algorytm regulacji zostanie utworzony w trzech etapach: transformacja zmiennych stanu, linearyzujące sprzężenie zwrotne, regulator optymalny dla zlinearyzowanego obiektu. Wektor stanu:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$$

zastępuje się wektorem stanu:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \Phi(\mathbf{x}) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ z]$$

gdzie:

$$z = x_2 \cdot x_4$$

Po wyznaczeniu pochodnej nowej zmiennej stanu, obiekt w nowych współrzędnych jest opisany równaniami:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_p} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_r} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_v} & \frac{1}{T_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_w} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (3)$$

$$\dot{z} = \frac{1}{T_p} \frac{z}{x_2} x_1 - z - \frac{1}{T_A} z + \frac{1}{T_A} x_2 u_2 \quad (4)$$

Równania (3) są równaniami liniowymi. Nieliniowości pojawiają się jedynie w równaniu (4). W tym równaniu jest także sygnał sterujący u_2 , który zostanie wykorzystany przez linearyzujące sprzężenie zwrotne (5). Wyznacza się je w ten sposób, aby lewa strona równania (4) była równa nowemu sygnałowi sterującemu \tilde{u}_2 .

$$u_2 = \Psi(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{u}_2) = \frac{T_A}{x_2} \left(\tilde{u}_2 - \frac{1}{T_p} \frac{x_1 z}{x_2} + \frac{1}{T_p} \frac{z^2}{x_2} + \frac{1}{T_A} z \right) \quad (5)$$

Po tych przekształceniach model obiektu staje się liniowy przy zmiennych stanu:

$$\tilde{\mathbf{x}} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ z]$$

i sygnałach sterujących:

$$\mathbf{u} = [u_1 \ \tilde{u}_2]$$

Wykonane przekształcenia są słuszne dla $x_2 > 0$. Podczas normalnej pracy bloku, moc może ulegać zmianom od 30% do 110%. Mając na uwadze, że zmienne stanu przyjmują wartości względne, można stwierdzić, że uzyskano dokładny model liniowy w całym zakresie zmian mocy bloku.

Układ regulacji wtórnej ma spowodować to, że moc produkowana przez turbinę będzie równa mocy zadanej, oraz to, że zawór niskoprężny będzie otwarty w 100%. Aby spełnić te wymogi, wprowadza się działania całkujące w postaci równań (6).

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= P - P_z \\ \dot{e}_2 &= -x_2 + z \end{aligned} \quad (6)$$

Liniowy model obiektu jest opisany równaniem (7).

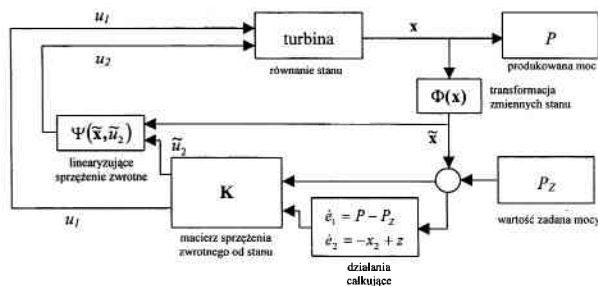
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{z} \\ \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_p} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_v} & \frac{1}{T_n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 1-\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ z \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_w} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_z \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dla powyższego obiektu wyznacza się optymalne sprzężenie zwrotne od stanu przy kwadratowym wskaźniku jakości.

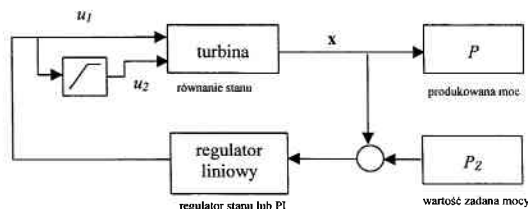
EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

Działanie nieliniowego układu regulacji sterującego dwoma zaworami (rys. 2) zostało porównane z układami liniowymi (rys. 3). Wzięto pod uwagę dwa układy liniowe. Jeden z regulatorem PI, a drugi z regulatorem stanu. W obydwu tych przypadkach regulator wypracowuje sygnał sterujący dla zaworu WP, a działanie zaworu NP jest sztywno związane z tym sygnałem poprzez charakterystykę statyczną pokazaną na rys. 4.

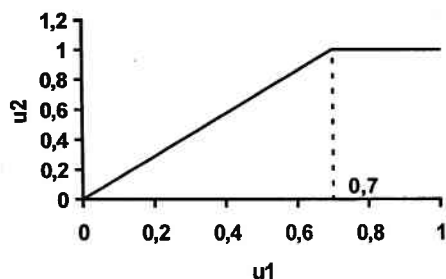
Porównanie działania powyższych układów regulacji zostanie zilustrowane na przykładzie dwu eksperymentów symulacyjnych. W obydwu przypadkach układ znajduje się w stanie równowagi



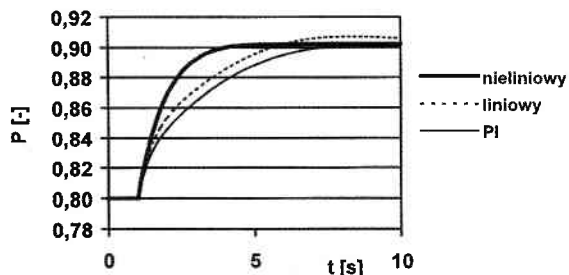
Rys. 2. Schemat układu regulacji z linearyzującym sprzężeniem zwrotnym



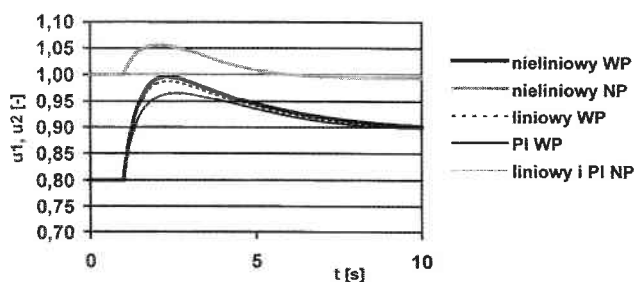
Rys. 3. Schemat porównawczych, liniowych układów regulacji



Rys. 4. Zależność stopnia otwarcia zaworu NP od stopnia otwarcia zaworu WP



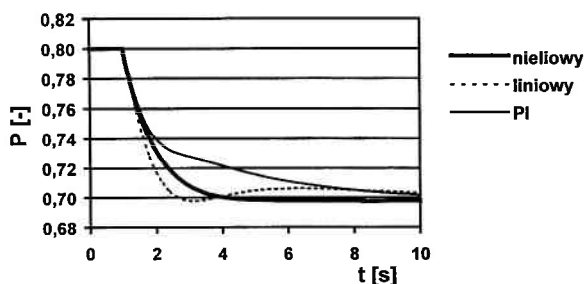
Rys. 5. Przebieg przejściowy zmian mocy P, wywołany skokową zmianą mocy zadanej Pz z 0.8 na 0.9



Rys. 6. Przebieg przejściowy zmian stopnia otwarcia zaworów WP i NP podczas zmiany mocy zadanej PZ z 0.8 na 0.9

produkując 0,8 mocy nominalnej. W pierwszym eksperymencie porównano reakcję układów na skokowy wzrost mocy zadanej o 0,1 (do 0,9) – rys. 5 i rys. 6, a w drugim na skokowy spadek mocy zadanej o 0,1 (do 0,7) – rys. 7 i rys. 8. Stałe czasowe przyjęto następujące: $T_W = 0.8$ [s], $T_P = 4$ [s], $T_N = 1.2$ [s], $T_A = 0.6$ [s], $\alpha = 0.3$. Sprzężenia proporcjonalne we wszystkich układach zostały tak dobrane, aby przy 10% zmianie mocy zadanej nie przekroczyć maksymalnej prędkości siłowników.

Podczas przyrostu mocy układ z regulatorem nieliniowym najszybciej osiąga zadaną wartość mocy. Dzieje się tak dlatego, że chwilowe otwarcie zaworu NP umożliwia wykorzystanie energii pary zakułowanej w przegrzewaczu międzystopniowym. Aby istniała możliwość wykorzystania tego zjawiska w praktyce, zawór NP powi-



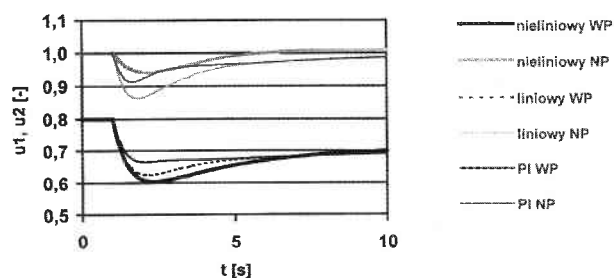
Rys. 7. Przebieg przejściowy zmian mocy P, wywołany skokową zmianą mocy zadanej PZ z 0.8 na 0.7

nien mieć możliwość otwarcia w zakresie ponad 100% (np. 0-110%). Dla wszystkich badanych układów regulacji maksymalna prędkość ruchu zaworów WP jest taka sama. Krzywe, obrazujące przebieg zmian stopnia otwarcia zaworu w czasie, mają tę samą styczną w momencie skokowej zmiany mocy zadanej (wtedy prędkość ruchu siłowników przedstawiających zawory jest największa). Zawór NP w układach liniowych nie zmienia swojego położenia. Pracuje on zawsze w obszarze nasycenia charakterystyki statycznej (rys. 4).

Podczas spadku mocy układ z regulatorem nieliniowym również najszybciej osiąga wartość zadaną. Jednak w tym przypadku wszystkie układy regulacji powodują przemykanie zaworów NP. W układach liniowych zawór WP zamyka się poniżej wartości 0,7, co powoduje jednoczesne zamykanie zaworu NP. Jednak te układy wykorzystują zawór NP nieprecyzyjnie, ze względu na jego sztywne powiązanie z zaworem WP. Układ z nieliniowym sprzężeniem zwrotnym od stanu precyzyjnie wykorzystuje zawór NP, tak jak to wynika z zależności analitycznych.

WNIOSKI

W niniejszej pracy zaproponowano nieliniowy układ jednoczesnego sterowania zaworami WP i NP turbiny dwustopniowej. Pod względem struktury algorytm regulacji jest bardziej złożony od



Rys. 8. Przebieg przejściowy zmian stopnia otwarcia zaworów WP i NP podczas zmiany mocy zadanej PZ z 0.8 na 0.7

tradycyjnych liniowych układów regulacji. Jednakże stosowane obecnie programowalne regulatory mikroprocesorowe pozwalają na implementację złożonych algorytmów.

Nieliniowy układ regulacji wykazuje swoją wyższość w szerokim zakresie zmian mocy, co zilustrowano na dwóch dobranych przykładach. Proponowany algorytm pozwala na precyzyjne wykorzystanie zaworu niskoprężnego.

W przedstawionym podejściu nie uwzględniono dynamiki kotła zakładając, że odpowiednia ilość pary jest dostarczana do turbiny. Kolejnym etapem prac jest rozwiązanie zagadnienia linearyzacji przez sprzężenie zwrotne modelu całego bloku energetycznego, uwzględniającego dynamikę kotła. Proponowane podejście wydaje się być obiecujące, ponieważ obiekty termo-energetyczne mają strukturę odpowiednią do linearyzacji przez sprzężenie zwrotne ze względu na szeregowo przekazywanie energii przez poszczególne urządzenia.

LITERATURA

- [1] W. BOLEK, J. SAŚIADEK, T. WIŚNIEWSKI: Synteza nieliniowego regulatora dla turbiny parowej. *Materiały XIII KKA t. II, Opole, 1999, ss 369-372.*
- [2] H. BOURLES, F. COLLEDANI, M.P. HOURY: Robust continuous speed governor control for small-signal and transient stability. *IEEE Trans. on Power Systems, 1997, v 12, n1, pp 129-135.*
- [3] L. GAO, L. CHEN, Y. FAN, H. MA: A non-linear control designs for power systems. *Automatica, 1992, v 28, n 5, pp 975-979.*
- [4] H. GŁADYŚ, R. MATLA: Praca elektrowni w systemie elektroenergetycznym. *WNT, Warszawa 1999.*
- [5] IEEE Commite Report: Dynamic models for fossil fuelled steam units in power system studies. *IEEE Trans. on Power Systems 1991, v 6, n 2, pp 753-761.*
- [6] A. ISIDORI: Non-linear control systems. *Springer-Verlag, London 1995.*
- [7] M. KRSTIĆ, I. KANELAKOPOULOS, P. KOKOTOVIĆ: Non-linear and adaptive control design. *John Wiley and Sons, New York 1995.*
- [8] P. KUNDUR: Power system stability and control. *McGraw-Hill, New York 1994.*
- [9] D. LAUDYN, M. PAWLIK, F. STRZELCZYK: Elektrownie. *WNT, Warszawa 1997.*
- [10] Q. LU, Y. Z. SUN: Non-linear stabilizing control of multi-machine systems. *IEEE Trans. on Power Systems 1989, v 4, n 1, pp 236-241.*
- [11] Y. WANG, D. HILL: Robust non-linear coordinated control of power systems. *Automatica 1996, v 32, n 4, pp 611-618.*