

# Synchronous Generator Model with Fractional Order Voltage Regulator $PI^bD^a$

## Author

Dariusz Spatek

## Keywords

synchronous generator, voltage regulator  $PI^bD^a$ , fractional derivative

## Abstract

Synchronous generator together with excitation circuit, voltage controller and system stabilizer constitute nonlinear ordinary differential equations set. The nonlinearity of differential equations set results from magnetic circuits saturation. One of the most important, from the electric energy distribution point of view, is the influence of voltage control applied on the generator voltage. There could be applied regulator either classical PID or fractional of type  $PI^bD^a$  which bases on the so-called fractional derivative idea. Numerical solutions of nonlinear differential equations set, that takes into account both magnetic circuits saturation and fractional regulator  $PI^bD^a$ , lead to decisions either to accept or to reject the chosen parameters. The sensibility of generator work on chosen fractional regulator parameters is the main aim of this paper. With the help of C++ program provided the most important states of work (short-circuit, setting voltage change, reactive power rejection) can be analyzed basing on the accepted model of synchronous generator such as (1,1), (2,2) or (3,3).

**DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015208**

## 1.1. Introduction

The numerical investigation of synchronous generator work is important problem for both generator and network analysis. The synchronous generator is equipped with voltage regulator and stabilizer. The voltage regulator is usually designed as a classical PID one, i.e. the output signal is given by first order derivative, integral and difference of the input signal. Nowadays, the voltage regulators are mostly realized in numerical way, i.e. there are applied processors and electronic circuits which accomplish output signals of the voltage regulators. This way of technical realization enables ones to develop the range of voltage regulator models. Namely, the voltage regulators of fractional orders  $PI^bD^a$  can be easily designed and accomplished at synchronous generators working in power plants.

The main question of this paper is: whether the proposed solution does improve some aspects of synchronous generator work at chosen transients?

In order to investigate this problem one requires model of synchronous generator and voltage regulator  $PI^bD^a$ .

The synchronous generator and voltage regulator are described by ordinary nonlinear differential equations set and fractional order derivative equation, respectively. The approach to this model gives an insight into model parameters and loci of generator-regulator, subsequently.

The numerical algorithm based on the model enables to describe the influence of voltage regulator parameters on synchronous generator transients.

The C++ program extending the previous version is available at [www.elekt.polsl.pl/dspalek/](http://www.elekt.polsl.pl/dspalek/).

## 1.2. Synchronous generator

The circuit models of synchronous generators are often applied for generator transient state analyses. The models lead to state equations set and base on the linear transformation of equivalent currents and voltages. The circuit models results from the two-axis linear transformation of stator and rotor currents and voltages (Fig. 1). Most commonly is used transformation d-q in the synchronous plane [1, 2, 3].

The most important physical phenomena in synchronous generator can be taken into account by means of equivalent circuits models. The number and scheme of the equivalent circuits could be various. The more developed equivalent scheme, the more state variables are introduced.

The currents for synchronous machine equivalent circuits, the angular speed  $\omega$ , power angle  $\delta$  and voltage controller steering angles  $\alpha_1, \alpha_2$  constitute the state variables. The ordinary differential equations set take the following form

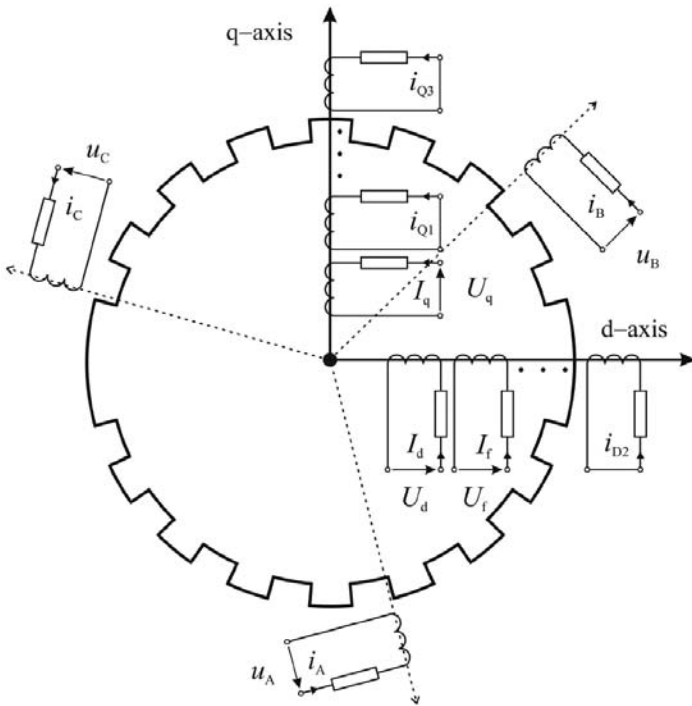


Fig. 1. Synchronous generator equivalent circuits

$$\frac{dx}{dt} = F(t, x) \tag{1}$$

where the vector of state variables is defined as follows

$$x = (I_d, I_f, i_{D1}, i_{D2}, I_q, i_{Q1}, i_{Q2}, i_{Q3}, \omega, \delta, \alpha_1, \alpha_2)^T \tag{2}$$

and  $I_d, I_q$  are the d-q axis transformed currents of the stator currents (for currents the motor notation is applied),  $I_f$  means

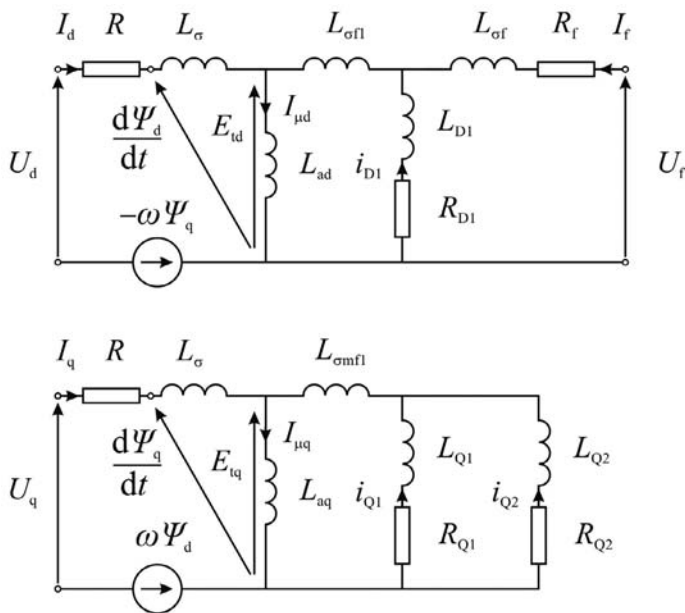


Fig. 2. Synchronous generator model of type (2,2)

the excitation current,  $i_{D1}, i_{D2}, i_{Q1}, i_{Q2}, i_{Q3}$  mean the equivalent currents for synchronous machine models. The last four variables of state vector denote:  $\omega$  rotor angular electrical speed of the rotor,  $\delta$  power (load) angle,  $\alpha_1, \alpha_2$  are steering variables for generator voltage controller [4] and are defined in Fig.5. The function  $F(t, x)$  is defined by equations presented below.

The number of currents chosen determinates the type of the synchronous generator model. The most simple is the model of the type (1,1) and the more developed is denoted as the (3,3) model. These models regard the transformation voltages. However, the synchronous generator model (2,2) is widely accepted for transient analyses (Fig. 2).

For (2,2) model the state variables are as follows

$$x = (I_d, I_f, i_{D1}, I_q, i_{Q1}, i_{Q2}, \omega, \delta, \alpha_1, \alpha_2)^T \tag{3}$$

The important problem for the models is to find the parameters value [5].

However, for either large electric power system or load rejection in d-axis these models can be replaced by e.g. GENROU model [6]. The GENROU, GENROE and other models create an differential equations set of four equations for electromagnetic state variables and two variables for mechanical state:  $\omega$  and  $\delta$ .

Moreover, in some models the transformation voltages of stator can be neglected. Mathematically, the stator transformation voltages can be neglected if for transients the following conditions could be accepted

$$|\omega\Psi_q| \gg |E_{td}| \cong |L_{ad} \frac{dI_d}{dt}| \cong \left| \frac{d\Psi_d}{dt} \right| \tag{4}$$

and

$$|\omega\Psi_d| \gg |E_{tq}| \cong |L_{aq} \frac{dI_q}{dt}| \cong \left| \frac{d\Psi_q}{dt} \right| \tag{5}$$

Particularly, these conditions are satisfied for transients of linear model applied with source of pulsation  $\omega_s$  in the case of

$$\frac{1}{T_{min}} \ll \omega_s \tag{6}$$

where  $T_{min}$  denotes the time constant of minimal value of the whole circuit model.

The function  $F(t, x)$  in (1) is built due to the electrical state equations (Kirchhoff equations), mechanical state equation, voltage regulator algorithm, subsequently.

Synchronous generator current equations are as follows

$$\frac{dI_D}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d3} \\ I_{d4} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_f \\ i_{D1} \end{bmatrix} = L_D^{-1} (U_D - E_D - R_D I_D) \tag{7}$$

where rotation voltage  $E_D$  for d-axis is denoted as follows

$$E_D = [-\omega\Psi_q, 0, 0, 0] \quad (8)$$

and

$$\frac{dI_Q}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{q1} \\ I_{q2} \\ I_{q3} \\ I_{q4} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Q1} \\ i_{Q2} \\ i_{Q3} \end{bmatrix} = L_Q^{-1}(U_Q - E_Q - R_Q I_Q) \quad (9)$$

where rotation voltage  $E_Q$  for q-axis is equal

$$E_Q = [\omega\Psi_d, 0, 0, 0]$$

The magnetic fluxes are equal to

$$\Psi_D = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{D1} \\ \Psi_{D2} \end{bmatrix} = L_D I_D, \quad \Psi_Q = \begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{Q1} \\ \Psi_{Q2} \\ \Psi_{Q3} \end{bmatrix} = L_Q I_Q \quad (11)$$

The matrices of inductances and resistances for the most developed model of type (3,3) are as follows and

$$R_D = [R, R_f, R_{D1}, R_{D2}] \quad (12)$$

$$R_Q = [R, R_{Q1}, R_{Q2}, R_{Q3}] \quad (13)$$

According to equations (7), (9) and (11) it is satisfied

$$\Psi_d = (L_{ad} + L_\sigma)I_d + L_{ad}I_f + L_{ad}i_{D1} + L_{ad}i_{D2} \quad (14)$$

$$\Psi_q = (L_{aq} + L_\sigma)I_q + L_{aq}i_{Q1} + L_{aq}i_{Q2} + L_{ad}i_{Q3} \quad (15)$$

The saturation of the magnetic circuit influences mostly on  $L_{ad}$  and  $L_{aq}$  inductances

$$L_{ad} = L_{ad}(I_d) \quad (16)$$

$$L_{aq} = L_{aq}(I_q) \quad (17)$$

$$L_f = \text{const} \quad (18)$$

The nonlinearity curves can be obtained by means of either electromagnetic field analysis or by measurements [5]. The developed model allows introducing different magnetization curves. Exemplary, in Fig. 3 inductances (16) and (17) and their derivatives vs. relative current are presented.

The nonlinearity of excitation inductance  $L_f$  is not taken into account. The nonlinearity of the magnetic circuit of synchronous leads to modification of the equivalent circuit. The most developed equivalent circuits are shown in Fig. 4.

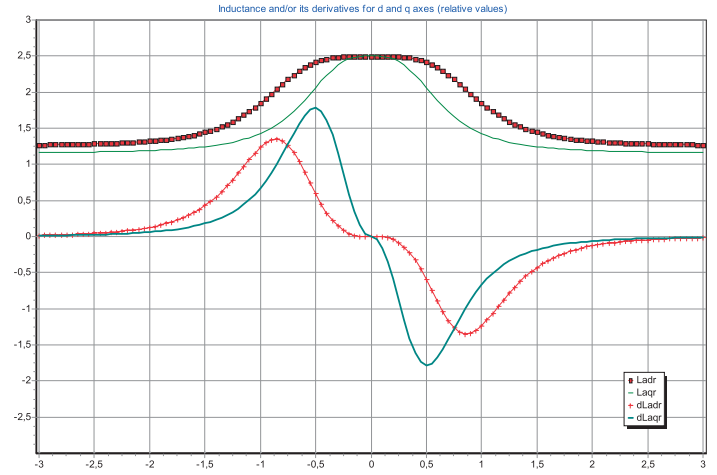


Fig. 3. Inductances for d and q axes and their derivatives vs. axis

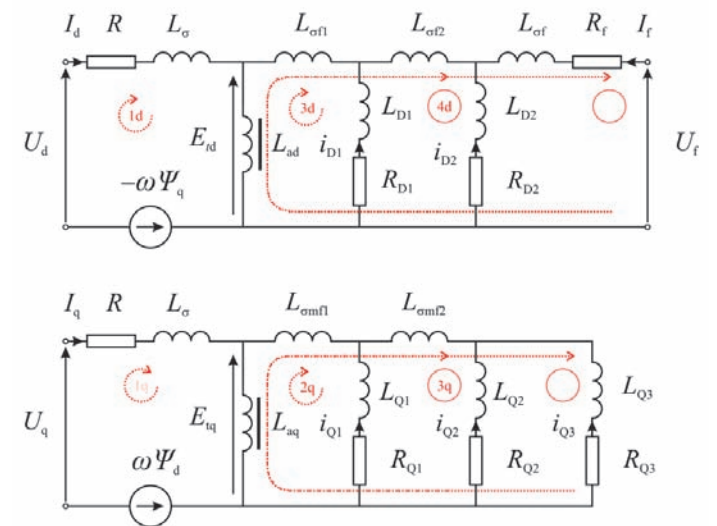


Fig. 4. Synchronous generator equivalent circuits

The mechanical state equation for the synchronous machine takes the form of

$$J \frac{d\omega}{p dt} = T_e + T_m + D(\omega_s - \omega) = -J \frac{d^2 \delta}{p dt^2} \quad (19)$$

where  $T_e$  means the electromagnetic torque

$$T_e = p(\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) \quad (20)$$

and  $T_m$  is the torque given by the turbine ( $T_m < 0$ ),  $D$  denotes the mechanical damping coefficient for the whole turbine-generator system.

The excitation voltage  $U_f$  for generator depends on the steering signal  $\alpha$  as follows

$$U_f = U_{fmax} \cos(\alpha) \quad (21)$$

where the steering signal  $\alpha$  for voltage regulation system is accomplished by the preamplifier [4], and takes the values for electromechanical (rotating) excitation systems

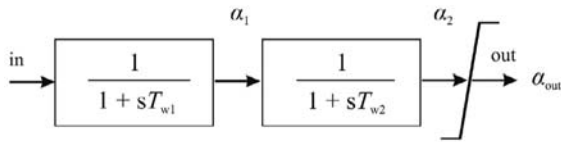


Fig. 5. Block scheme for exciter controller

$$\alpha_{out} \in (0, \pi/2) \tag{22a}$$

and for static excitation systems (reversible converter and transformer)

$$\alpha_{out} \in (-\pi/2, \pi/2) \tag{22b}$$

The excitation system block diagram with two inertia levels (two time constants) is shown in Fig. 5.

The input signal for the excitation system is equipped with PID or Pl<sup>b</sup>D<sup>a</sup> voltage regulator. The whole steering signal  $\alpha$  accomplish both voltage controller and system stabilizer (power system stabilizer) according to the relation

$$\alpha = \alpha_{out} + \beta \tag{23}$$

where  $\alpha$  means the steering signal in (21).

### 1.3. Fractional order voltage regulator

The voltage regulator applied to synchronous generators is the classical PID regulator, usually. The PID voltage regulator (the classical) is defined by the equation

$$\beta_1(s) = K(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D)\Delta U(s) \tag{24}$$

where  $\Delta U(s)$  means the  $\Gamma$  generator voltage change,  $K$  controller PID amplification coefficient,  $T_I$  integration time-constant,  $T_D$  differentiation time-constant. The PID regulator accomplishes the output signal basing on the first order derivative (i.e. of integer order) and single integral of input signal.

The fractional order derivative can be also applied for regulation purposes [7] by means of Pl<sup>b</sup>D<sup>a</sup> formula

$$\beta_1(s) = K(1 + \frac{1}{(sT_I)^b} + (sT_D)^a)\Delta U(s) \tag{25}$$

The fractional order derivative (the so-called differintegral) can be introduced by Grünwald-Letnikov definition as follows [7]

$$D^a f = \frac{1}{h^a} \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{t-t_0}{h} \rfloor} (-1)^i \Gamma(a+1) f(t-ih) \tag{26}$$

where  $\lfloor \cdot \rfloor$  denotes the integer part of the argument i.e the so-called floor function,  $t_0$  denotes start point (often  $t_0 = 0$ ),

$h$  means the step (Fig. 6),  $\Gamma(\cdot)$  means Euler-gamma function, e.g.  $\Gamma(n+1) = n!$  for integer  $n$ .

It should be emphasized that in theory of fractional calculus are introduced other definitions of fractional order derivatives and integrals.

Laplace transform of differintegral (26) – at zero initial condition – is as follows [7].

$$D^a f(t) \rightarrow s^a F(s) \tag{27}$$

The fractional order of the derivative  $a$  can be any positive and negative real number. For integer  $a = n$  the fractional order derivative is the classical derivative of  $n$ -th order, and the sum (26) consists of finite number of terms equal to  $n + 1$ .

Because, in Eqn (25) the “integral” term  $1/(sT_I)^b$  for  $b > 0$  can be accomplished by “differential” term in the form of  $(sT_D)^a$  for  $a < 0$  thus henceforth it is considered the voltage regulator defined by the relation

$$\beta_1(s) = K(1 + (sT_D)^a)\Delta U(s) \tag{28}$$

which is simpler for technical realization than the algorithm given by Eqn (25), and involves integration as well.

The problem arising while fractional order derivative (differintegral) is numerically evaluated is that the number of terms  $[(t - t_0)/h] + 1$  becomes enormously large for great  $t$ . In order to avoid this problem, it is added only limited number of terms  $N_i$  for the time points from finite interval  $[t - \Delta, t]$  of ‘recent past’ (Fig. 6).

The algorithm resulting from Eqn (28) is developed by means of definition (26) for both the technical realization and the numerical implementation when  $N_i$  terms of the sum are taken into account. From the physical point of view the number of terms  $N_i$  should depend on the speed of voltage changes, e.g. it can assumed  $c = 20$  probes per the time-period  $T = 1/f_s$  along a certain number  $n$  of time-periods  $T$  ( $c$  is chosen due to experiences and also can be greater or lower than 20). The algorithm in time-domain (Fig. 6) takes the simple form of

$$D^a f \approx h^{-a} \sum_{i=0}^{N_i} w_i f_i \tag{29}$$

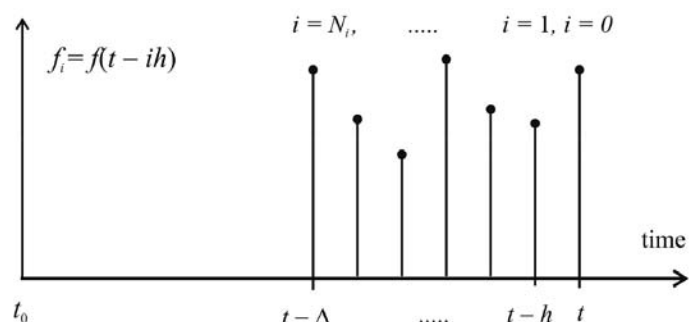


Fig. 6. Fractional order derivative – notation for algorithm

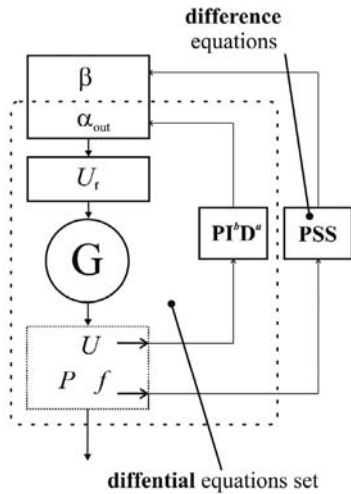


Fig. 7. Differential – difference model for generator, voltage controller and stabiliser system

where  $w_i = -w_{i-1}(a - i)/(1 + i)$ ,  $w_0 = 1$ ,  $h = \Delta/N_i$

It should be pointed out that fuzzy-logic voltage regulators [8] can be also applied, but in this paper are not considered.

### 1.4. Power stabilizer

The system stabilisers (output signal  $\beta$ ) can be designed in many different ways [9, 10, 11]. The power system stabilisers with two inputs (frequency, power) are recommended to be installed at synchronous generators of power greater than 100 MW. The mathematical description of stabiliser is determined by the way

of its technical realization and usually is given by difference equations set as shown in Fig. 7.

## 2. Numerical analysis

### 2.1. Numerical program

In order to investigate the features of the models and investigate its sensitivity to some parameters is used the elaborated numerical program which is available at <http://www.elekr.polsl.pl/dspalek> (Fig. 8).

### 2.2. Numerical model of synchronous generator

The elaborated program enables to choose the set of parameters important for simulation for models (1,1), (2,2) and (3,3) regarding the nonlinearity of magnetic circuit. The program can investigate the sensitivity to each synchronous generator model parameter to transients. The program also take into account the type of the voltage regulator considered either the classical PID or fractional order  $PI^bD^a$ .

The simulation results provided by the program lead to the conclusions of which model, parameters and regulators assure the suitable work of the whole system.

Exemplary, chosen states of synchronous generator transients have been approached:

- reactive power rejection
- setting voltage change
- symmetrical short-cut, subsequently.

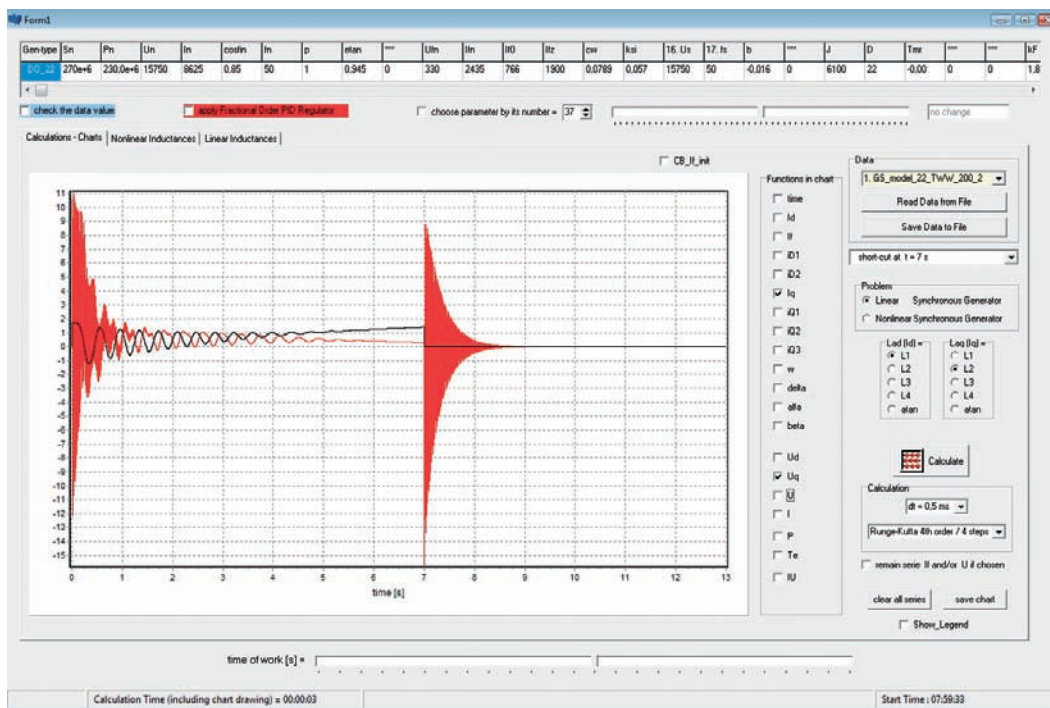


Fig. 8. Main form of the program (available at <http://www.elekr.polsl.pl/dspalek/>)



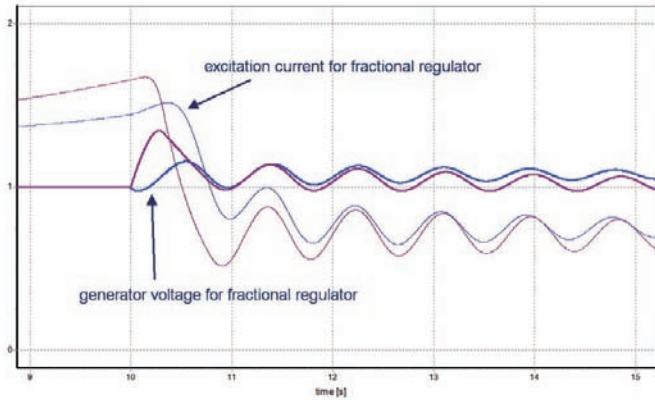


Fig. 9. Reactive power rejection. Excitation current  $I_f$  and generator voltage  $U$  (linear circuit)

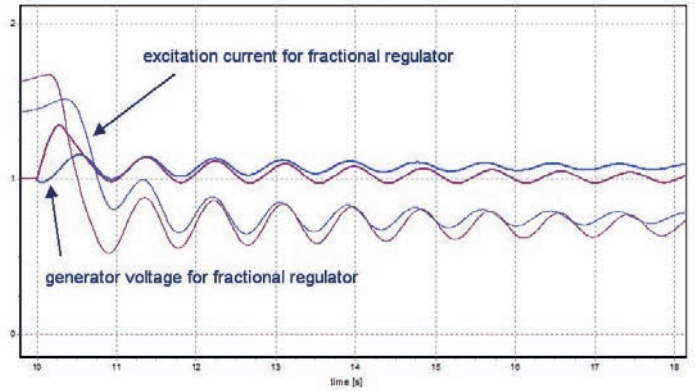


Fig. 10. Reactive power rejection. Excitation current  $I_f$  and generator voltage  $U$  (nonlinear circuit)

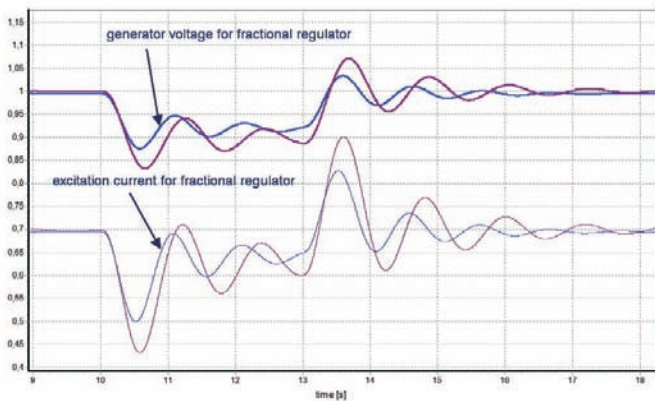


Fig. 11. Setting voltage change  $\pm 10\%$ . Excitation current  $I_f$  and generator voltage  $U$  (linear circuit)

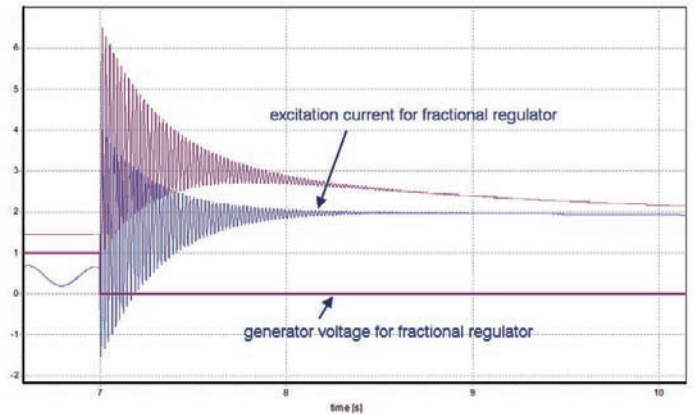


Fig. 12. Symmetrical short-cut. Excitation current  $I_f$  and generator voltage  $U$  (linear circuit)

The model linear and nonlinear of type (2,2) for synchronous generator TWW-200-2 has been considered. The model parameters are as follows:

$S_n = 270$  MVA,  $P_n = 230$  MW,  $U_n = 15,75$  kV,  $I_n = 8625$  A,  
 $\cos\varphi_n = 0,85$ ,  $f_n = 50$  Hz,  $p = 1$ ,  $U_{fn} = 330$  V,  $I_{fn} = 2435$  A,  
 $I_{f0} = 766$  A,  $I_{fz} = 1900$  A,  $kF = 1,8$ .

PID regulator:  $K = 0$ ,  $T_i = 3$  s,  $T_D = 0,1$  s.

$PI^bD^a$  Fractional regulator settings:  $a = 0,5$ ,  $b = 0$ ,  $T_a = 0,001$  s.

Parameters for linear generator model type (2,2) (per unit system):

$L_{ad} = 2,48$ ,  $L_{aq} = 2,48$ ,  $L_s = 0,139$ ,  $R = 0,001676$ ,  $L_{sf} = 0,139$ ,  
 $R_f = 0,001128$ ,  $L_{D1} = 0,06$ ,  $R_{D1} = 0,0004046$ ,  $L_{sf1} = 0$ ,  $L_{D2} = \text{infinity}$ ,  
 $R_{D2} = \text{infinity}$ ,  $L_{sf2} = 0$ ,  $L_{Q1} = 0,332$ ,  $R_{Q1} = 0,011$ ,  $L_{smf1} = 0$ ,  
 $L_{Q2} = 0,112$ ,  $R_{Q2} = 0,024$ ,  $L_{smf2} = 0$ ,  $L_{Q3} = \text{infinity}$ ,  $R_{Q3} = \text{infinity}$ .

For the nonlinear model of generator are chosen magnetization curves presented in Fig. 3.

Excitation parameters:  $T_{w1} = 0,1$  s,  $T_{w2} = 0,2$  s.

The synchronous generator equipped with voltage regulator PID (the output signal is given by first order derivative, integral and difference of the input signal) could be replaced by fractional regulator. The presented states of work confirm that the *fractional orders*  $PI^bD^a$  voltage regulators can be applied for synchronous generators.

However, it should be pointed out that not all transients obtained were satisfactory!

In order to investigate voltage regulator  $PI^bD^a$  work the model of synchronous generator is being developed.

The numerical algorithm based on the model enables to describe the influence of voltage regulator parameters on synchronous generator transients.

### 3. Conclusions

The circuits model of synchronous generator equipped with the *fractional orders*  $PI^bD^a$  voltage regulators has been developed:

- the nonlinearity has been taken into account
- the model of type (2,2) is considered
- the classical voltage regulator PID has been compared with the *fractional order*  $PD^a$ , widely.

The elaborated program available on web site <http://www.elektr.polsl.pl/dspalek/> is being developed continuously [12, 13, 14, 15, 16].

The approaches of the algorithm described of the model describes the influence of voltage fractional regulator parameters on synchronous generator transients. The analysis should be developed in the future.

## REFERENCES

---

1. Adkins B., Harley P.G., The general theory of alternating current machine, Chapman and Hall, London 1978.
  2. Paszek W., Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego [Transient state of alternating current electric machines], WNT 1984.
  3. Latek W., Turbogeneratory [Turbogenerators], WNT 1973.
  4. Janson Z. et al., ETEF 200C – Mikroprocesorowy układ wzbudzenia generatora 200 MW [ETEF 200C – Microprocessor excitation system for generator 200 MW], *Energetyka* 1997, pp. 199–204.
  5. Berhausen S., Paszek S., Estymacja parametrów modelu generatora synchronicznego pracującego w wielomaszynowym systemie elektroenergetycznym [Parameter estimation of the model of a synchronous generator working in multimachine power system], *Przegląd Elektrotechniczny* 2011, No. 8, pp. 192–197.
  6. Paszek S. et al., Pomiarowa estymacja parametrów dynamicznych generatorów synchronicznych i układów wzbudzenia pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym [Measurements estimation of synchronous machines and excitation systems parameters working in national power system], Politechnika Śląska, Gliwice, 2013.
  7. Shantanu Das, Functional Fractional Calculus, ISBN 978-3-642-20544-6 Springer Verlag, 2011.
  8. Barbos de J-C., New optimal fuzzy-PID controller structure, Proceedings of ICEM, 2002, Brugge 2002, p. 216.
  9. Robak S., Hierarchiczne sterowanie napięcia wzbudzenia generatora synchronicznego [Hierarchic regulation of synchronous generator excitation voltage] *Archiwum Energetyki* 2000, Vol. XXIX, No. 1–2, pp. 89–109.
  10. Gładyś H., Matla H., Praca elektrowni w systemie elektroenergetycznym [Power station work in electro-energetical system] WNT 1999.
  11. Mello de F.P., Hannet L.N., Undrill J.M., Practical approaches to supplementary stabilising from accelerating power, IEEE Transaction, Vol. PAS-97, 1978, pp. 1515–1522.
  12. Spalek D., Analysis of excitation system modified for power station generator. Proceedings of ICEM, 2000, Vol. II, Helsinki 2000, pp. 977–981.
  13. Spalek D., Turbogenerator as a electromechanical converter – transient states, Sympozjum PPEE, 2000, Wisła 2000, pp. 295–300.
  14. Spalek D., Approach to synchronous generator with power system stabilizer described by difference-differential equations, XIV Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Vol. I, Jurata 2009, pp. 247–258.
  15. Spalek D., Synchronous generator model sensitivity to parameters for transients approach, APE 2011, Vol. I, pp. 203–212.
  16. Spalek D., Synchronous generator model with nonlinear magnetic circuit, Proceedings of Conference APEm’2013, *Acta Energetica* 2013, No. 4/17, pp. 143–157
- 

## Dariusz Spalek

Politechnika Śląska

e-mail: Dariusz.Spalek@polsl.pl

Prof. dr hab. inż., graduate at Politechnika Śląska in Gliwice (1988, 1994, 2002, 2010), scientific scholarship of DAAD Foundation at Technische Universität Erlangen-Nürnberg in Germany (1996). Worked as specialist in PUE Energotest-Energopomiar in Gliwice and Energotest-Gdańsk sp. z o.o. in Gdańsk (full-time 1999–2000, part-time 2000–2007). Took part on modernization of excitations and stabilizers systems for synchronous generators in energy plants e.g. Dolna Odra, Łaziska, Rybnik, Kozienice, Pątnów. He is one author of 80 scientific papers and 2 books, as well as co-author of 70 papers and 2 academic books.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 78–84. When referring to the article please refer to the original text.

PL

## Model generatora synchronicznego z uławkowym regulatorem napięcia $PI^bD^a$

### Autor

Dariusz Spalek

### Słowa kluczowe

generator synchroniczny, regulator napięcia  $PI^bD^a$ , pochodna uławkowa

### Streszczenie

Generator synchroniczny wraz z układem wzbudzenia, regulatorem napięcia i stabilizatorem jest obiektem, którego zachowanie można opisać układem równań różniczkowych zwyczajnych nieliniowych. Nieliniowość równań różniczkowych jest wynikiem nasycania się obwodu magnetycznego generatora synchronicznego. Na pracę generatora z punktu widzenia energetyki ma istotny wpływ zastosowany regulator napięcia, czy to klasyczny PID, czy też uławkowy typu  $PI^bD^a$  wykorzystujący pochodne rzędu niecałkowitego. Rozwiązanie numeryczne układu równań różniczkowych nieliniowych, uwzględniających nasycenie obwodu magnetycznego oraz zastosowanie regulatora uławkowego  $PI^bD^a$ , pozwala na ocenę i dobór parametrów regulatora. Wrażliwość na wybrane parametry regulatora jest przedmiotem analiz numerycznych. Program autorski C++ pozwala na ocenę pracy generatora w wybranych stanach nieustalonych (zwarcie, zaburzenie napięcia zadanego, zrzut mocy czynnej), z wykorzystaniem wybranego modelu generatora synchronicznego (1,1), (2,2) lub (3,3).

### 1. Modele generatora synchronicznego i regulatora napięcia

#### 1.1. Wprowadzenie

Analizy numeryczne pracy generatora synchronicznego stanowią ważną kwestię dla analizy zarówno generatora, jak i sieci. Generator synchroniczny jest wyposażony w regulator i stabilizator napięcia. Regulatory napięcia zwykle projektuje się jako klasyczne regulatory PID, tzn. sygnał wyjściowy określony jest przez pochodną pierwszego rzędu, całkę i różnicę sygnału wejściowego. Obecnie regulatory napięcia przeważnie realizują proces w sposób numeryczny, czyli za pomocą procesorów i układów elektronicznych, które wypracowują sygnały wyjściowe tych regulatorów. Ten sposób realizacji technicznej umożliwia tworzenie wielu różnych modeli regulatorów napięcia. W szczególności można łatwo projektować regulatory napięcia rzędu uławkowego  $PI^bD^a$  i wyposażać w nie generatory synchroniczne mające zastosowanie w elektrowniach.

Główne pytanie tego artykułu brzmi: czy proponowane rozwiązanie poprawia niektóre aspekty pracy generatora synchronicznego w wybranych stanach nieustalonych?

Do zbadania tego problemu potrzebny jest model generatora synchronicznego i regulatora napięcia  $PI^bD^a$ .

Generator synchroniczny i regulator napięcia opisuje się odpowiednio układem zwyczajnych nieliniowych równań różniczkowych i uławkowym równaniem różniczkowym. Takie podejście do omawianego modelu umożliwia wgląd w jego parametry, a następnie *loci* generatora-regulatora.

Algorytm numeryczny oparty na wymienionym modelu pozwala opisać wpływ parametrów regulatora napięcia na stany nieustalone generatora synchronicznego.

Autorska wersja programu napisanego w C++, rozszerzająca jego poprzednią wersję, jest dostępna na stronie: [www.elekt.pol.pl/dspalek/](http://www.elekt.pol.pl/dspalek/).

#### 1.2. Generator synchroniczny

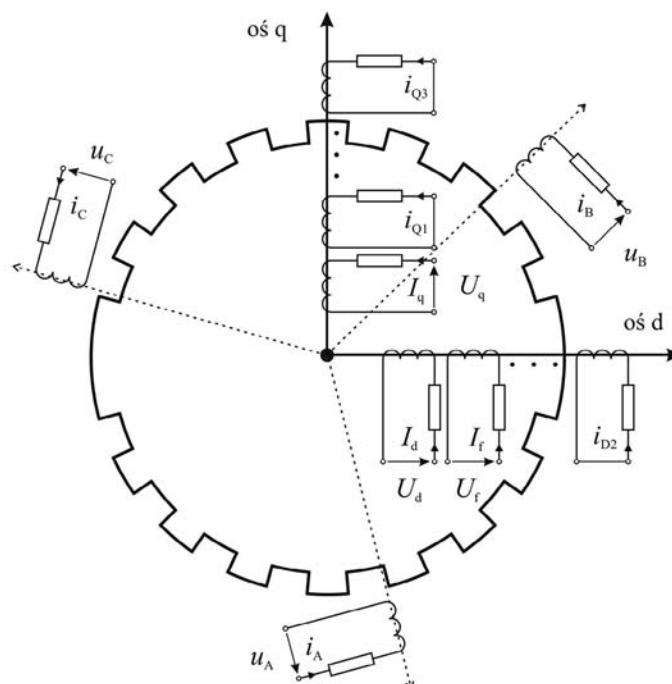
Modele obwodów generatorów synchronicznych często stosuje się do analizy stanów nieustalonych generatora. Z modeli tych wyprowadza się układ równań stanu polegających na liniowej transformacji równoważnych prądów i napięć. Modele obwodów wynikają z dwuosiowej transformacji liniowej prądów i napięć stojana i wirnika (rys. 1). Najczęściej stosowana jest transformacja d-q w płaszczyźnie synchronicznej [1, 2, 3].

Najważniejsze zjawiska fizyczne w generatorze synchronicznym można uwzględnić

za pomocą modeli schematów zastępczych. Liczba i postacie schematów zastępczych mogą być różnorodne. Im bardziej rozwinięty schemat zastępczy, tym więcej wprowadzanych jest zmiennych stanu.

Prądy w schematach zastępczych maszyn synchronicznych, prędkość kątowna, kąt obciążenia  $\delta$  i kąty sterowania sterownika napięcia  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  stanowią zmienne stanu. Układ zwyczajnych równań różniczkowych przyjmuje następującą formę:

$$\frac{dx}{dt} = F(t, x) \quad (1)$$



Rys. 1. Schemat zastępczy generatora synchronicznego s



gdzie wektor zmiennych stanu zdefiniowany jest następująco:

$$x = (I_d, I_f, i_{D1}, i_{D2}, I_q, i_{Q1}, i_{Q2}, i_{Q3}, \omega, \delta, \alpha_1, \alpha_2)^T \quad (2)$$

a  $I_d, I_q$  są prądami stojana przekształconymi w osi d-q (dla prądów stosuje się oznaczenie silnika),  $I_f$  oznacza prąd wzbudzenia,  $i_{D1}, i_{D2}, i_{Q1}, i_{Q2}, i_{Q3}$  oznaczają równoważne prądy dla modeli maszyn synchronicznych. Ostatnie cztery zmienne wektora stanu oznaczają:  $\omega$  prędkość kątową pola elektrycznego wirnika,  $\delta$  kąt mocy (obciążenia),  $\alpha_1, \alpha_2$  to zmienne sterujące sterownika napięcia generatora [4], które zdefiniowano na rys. 5. Funkcję  $F(t, x)$  definiują przedstawione poniżej równania.

Liczba wybranych prądów określa typ modelu generatora synchronicznego. Najprostszy jest model typu (1,1), a najbardziej rozwinięty jest model oznaczony jako (3,3). Modele te uwzględniają napięcia transformacji. Jednakże do analiz stanów nieustalonych (rys. 2) powszechnie przyjmuje się model generatora synchronicznego (2,2).

Model (2,2) zawiera następujące zmienne stanu:

$$x = (I_d, I_f, i_{D1}, I_q, i_{Q1}, i_{Q2}, \omega, \delta, \alpha_1, \alpha_2)^T \quad (3)$$

Istotnym problemem przy tych modelach jest znalezienie wartości parametrów [5]. Jednakże przy dużych systemach elektroenergetycznych lub zrzucie mocy w osi d modele te można zastąpić na przykład modelem GENROU [6]. Modele GENROU, GENROE i inne tworzą układ czterech równań różniczkowych dla zmiennych stanu elektromagnetycznego i dwóch dla zmiennych stanu mechanicznego:  $\omega$  oraz  $\delta$ . Co więcej, w niektórych modelach można pominąć napięcia transformacji stojana. Matematycznie napięcia transformacji stojana da się pominąć, jeśli dla stanów nieustalonych można przyjąć następujące warunki:

$$|\omega\Psi_q| \gg |E_{td}| \cong \left| L_{ad} \frac{dI_d}{dt} \right| \cong \left| \frac{d\Psi_d}{dt} \right| \quad (4)$$

oraz

$$|\omega\Psi_d| \gg |E_{tq}| \cong \left| L_{aq} \frac{dI_q}{dt} \right| \cong \left| \frac{d\Psi_q}{dt} \right| \quad (5)$$

W szczególności warunki te są spełnione dla stanów nieustalonych modelu liniowego ze źródłem pulsacji  $\omega_s$  w przypadku:

$$\frac{1}{T_{\min}} \ll \omega_s \quad (6)$$

gdzie  $T_{\min}$  oznacza stałą czasową o minimalnej wartości całego modelu obwodu. Funkcja  $F(t, x)$  w (1) zbudowana jest w oparciu o równania stanu elektrycznego (równania Kirchhoffa), równania stanu mechanicznego, a następnie na podstawie algorytmu regulacji napięcia. Równania prądów generatora synchronicznego są następujące:

$$\frac{dI_D}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d3} \\ I_{d4} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_f \\ i_{D1} \\ i_{D2} \end{bmatrix} = L_D^{-1} (U_D - E_D - R_D I_D) \quad (7)$$

gdzie napięcie rotacji  $E_D$  dla osi d jest opisane następująco:

$$E_D = [-\omega\Psi_q, 0, 0, 0] \quad (8)$$

oraz

$$\frac{dI_Q}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{q1} \\ I_{q2} \\ I_{q3} \\ I_{q4} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_q \\ i_{Q1} \\ i_{Q2} \\ i_{Q3} \end{bmatrix} = L_Q^{-1} (U_Q - E_Q - R_Q I_Q) \quad (9)$$

gdzie napięcie rotacji  $E_Q$  dla osi q równa się:

$$E_Q = [\omega\Psi_d, 0, 0, 0] \quad (10)$$

Strumienie magnetyczne są równe:

$$\Psi_D = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{D1} \\ \Psi_{D2} \end{bmatrix} = L_D I_D, \quad (11)$$

$$\Psi_Q = \begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{Q1} \\ \Psi_{Q2} \\ \Psi_{Q3} \end{bmatrix} = L_Q I_Q$$

Macierze indukcyjności i rezystancji dla najbardziej rozwiniętego modelu typu (3,3) są następujące:

$$R_D = [R, R_f, R_{D1}, R_{D2}] \quad (12)$$

$$R_Q = [R, R_{Q1}, R_{Q2}, R_{Q3}] \quad (13)$$

Zgodnie z równaniami (7), (9) i (11) spełnione są warunki:

$$\Psi_d = (L_{ad} + L_\sigma)I_d + L_{ad}I_f + L_{ad}i_{D1} + L_{ad}i_{D2} \quad (14)$$

$$\Psi_q = (L_{aq} + L_\sigma)I_q + L_{aq}i_{Q1} + L_{aq}i_{Q2} + L_{aq}i_{Q3} \quad (15)$$

Nasylenie obwodu magnetycznego wpływa głównie na indukcyjności  $L_{ad}$  oraz  $L_{aq}$ .

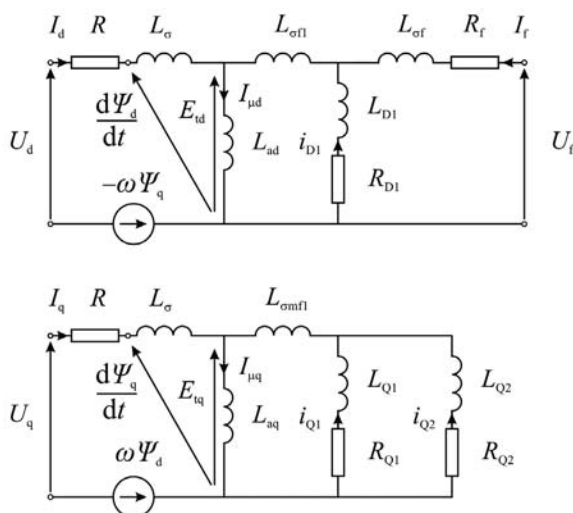
$$L_{ad} = L_{ad}(I_d) \quad (16)$$

$$L_{aq} = L_{aq}(I_q) \quad (17)$$

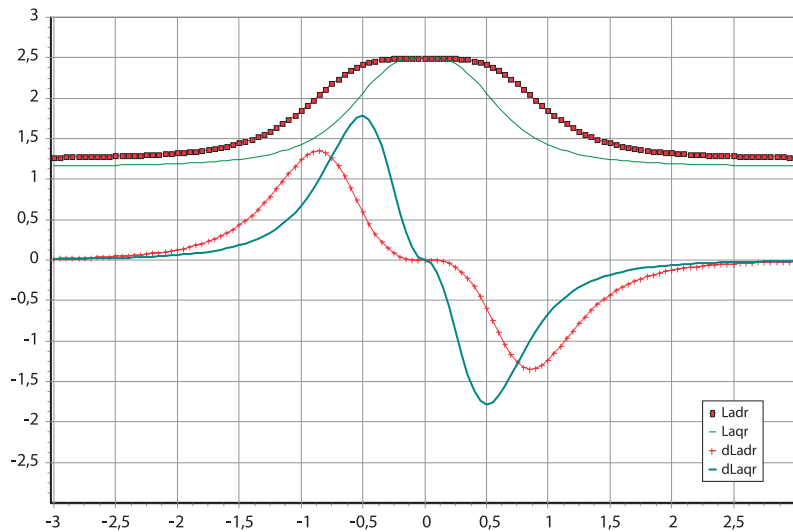
$$L_f = \text{const} \quad (18)$$

Krzywe nieliniowości można uzyskać poprzez analizę pola elektromagnetycznego lub pomiar [5]. Ten rozwinięty model pozwala na wprowadzenie różnych krzywych magnesowania. Na przykład rys. 3 przedstawia indukcyjności (16) oraz (17), a także ich pochodne w funkcji prądu względnego.

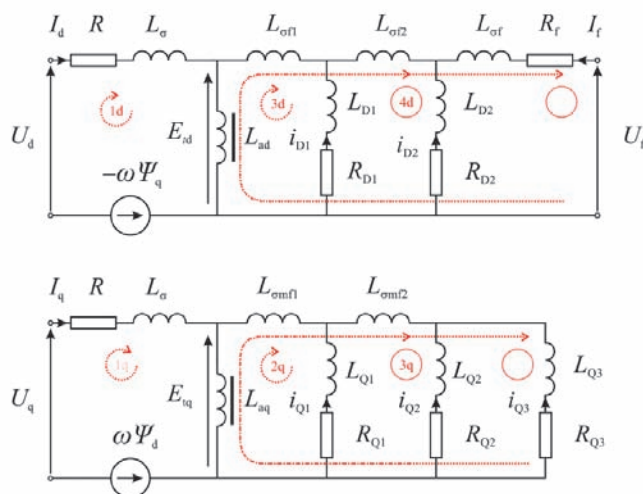
Pominięto nieliniowość indukcyjności wzbudzenia  $L_f$ . Nieliniowość obwodu magnetycznego generatora synchronicznego prowadzi do modyfikacji schematu



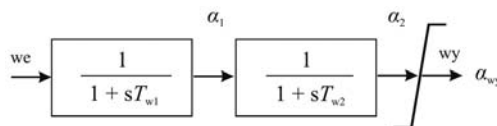
Rys. 2. Model generatora synchronicznego typu (2,2)



Rys. 3. Indukcyjności dla osi d oraz q i ich pochodne w funkcji prądu względnego osi



Rys. 4. Schemat zastępczy generatora synchronicznego



Rys. 5. Schemat blokowy regulatora wzbudzenia

zastępczego. Najbardziej rozwinięte schematy zastępcze przedstawiono na rys. 4. Równanie stanu mechanicznego tej maszyny synchronicznej przyjmuje postać:

$$J \frac{d\omega}{pdt} = T_e + T_m + D(\omega_s - \omega) = -J \frac{d^2\delta}{pdt^2} \quad (19)$$

gdzie  $T_e$  oznacza moment elektromagnetyczny

$$T_e = p(\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) \quad (20)$$

a  $T_m$  to moment obrotowy nadany przez turbinę ( $T_m < 0$ ), natomiast  $D$  oznacza współczynnik tłumienia mechanicznego dla całego turbogeneratora.

Napięcie wzbudzenia  $U_f$  generatora zależy od sygnału sterującego  $\alpha$ , jak przedstawiono poniżej:

$$U_f = U_{fmax} \cos(\alpha) \quad (21)$$

gdzie sygnał sterujący  $\alpha$  dla systemu regulacji napięcia realizowany jest przez przedwzmacniacz [4], który dla elektromechanicznych (wirujących) układów wzbudzenia przyjmuje wartości:

$$\alpha_{wy} \in (0, \pi/2) \quad (22a)$$

a dla statycznych układów wzbudzenia (przekształtnik rewersyjny i transformator):

$$\alpha_{wy} \in (-\pi/2, \pi/2) \quad (22b)$$

Schemat blokowy układu wzbudzenia o dwóch poziomach bezwładności (dwóch stałych czasowych) przedstawiono na rys. 5. Sygnał wejściowy istnieje dla układu wzbudzenia wyposażonego w regulator napięcia PID lub  $PI^bD^a$ .

Cały sygnał sterujący  $\alpha$  realizują zarówno regulator napięcia, jak i stabilizator systemowy (stabilizator systemu elektroenergetycznego), zgodnie z równaniem:

$$\alpha = \alpha_{wy} + \beta \quad (23)$$

gdzie  $\alpha$  oznacza sygnał sterujący w (21).

### 1.3. Ułamkowy regulator napięcia

Do regulacji napięcia generatorów synchronicznych zazwyczaj stosuje się klasyczne regulatory PID. Regulator napięcia PID (klasyczny) jest określony równaniem:

$$\beta_1(s) = K \left( 1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) \Delta U(s) \quad (24)$$

gdzie:

$\Delta U(s)$  oznacza zmianę napięcia generatora,  $K$  współczynnik wzmocnienia regulatora PID,  $T_I$  stałą czasową całkowania,  $T_D$  stałą czasową różniczkowania. Regulator PID realizuje sygnał wyjściowy na podstawie pierwszej pochodnej (czyli rzędu całkowanego) i całki pojedynczej sygnału wejściowego.

Do celów regulacyjnych można także stosować pochodną rzędu ułamkowego [7] na podstawie wzoru  $PI^bD^a$ :

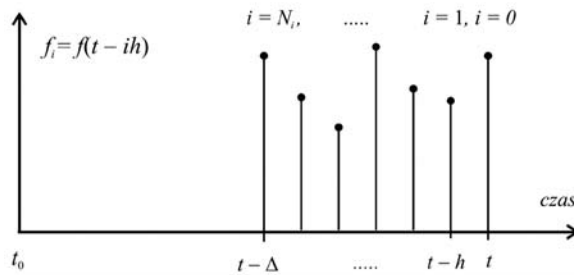
$$\beta_1(s) = K \left( 1 + \frac{1}{(sT_I)^b} + (sT_D)^a \right) \Delta U(s) \quad (25)$$

Pochodną rzędu ułamkowego (tzw. pochodno-całkę) można wyprowadzić z definicji Grünwalda-Letnikova [7] w następujący sposób:

$$D^a f = \frac{1}{h^a} \sum_{i=0}^{\lceil \frac{t-t_0}{h} \rceil} \frac{(-1)^i \Gamma(a+1)}{i! \Gamma(a+1-i)} f(t-ih) \quad (26)$$

gdzie:

$[\cdot]$  oznacza część całkowitą argumentu, czyli tzw. funkcję podłogi,  $t_0$  oznacza punkt początkowy (często  $t_0 = 0$ ),  $h$  oznacza krok (rys. 6),  $\Gamma(\cdot)$  oznacza funkcję gamma Eulera, np.  $\Gamma(n+1) = n!$  dla liczby całkowitej  $n$ . Należy podkreślić, że w teorii pochodnych ułamkowych wprowadzono inne definicje pochodnych i całek rzędu ułamkowego. Transformata Laplace'a różniczko-całkę (26) – przy zerowym stanie początkowym – jest następująca [7]:



Rys. 6. Pochozna rzędu ułamkowego – zapis dla algorytmu

$$D^a f(t) \rightarrow s^a F(s) \quad (27)$$

Rząd ułamkowy pochodnej  $a$  może być dowolną dodatnią lub ujemną liczbą rzeczywistą. Dla liczby całkowitej  $a = n$  pochodna ułamkowa jest klasyczną pochodną rzędu  $n$ -tego, a suma (26) zawiera skończoną liczbę składników równą  $n + 1$ .

Ponieważ w równaniu (25) składnik „całkowy”  $1/(sT_D)^b$  dla  $b > 0$  może być realizowany przez składnik „różniczkowy” w postaci  $(sT_D)^a$  dla  $a < 0$ , w ten sposób uwzględnia się regulację napięcia określoną zależnością:

$$\beta_i(s) = K(1 + (sT_D)^a)\Delta U(s) \quad (28)$$

która jest prostsza do realizacji technicznej niż algorytm uzyskany za pomocą równania (25), a także obejmuje całkowanie.

Problemem pojawiającym się przy numerycznej ocenie pochodnej rzędu ułamkowego (różniczko-całki) jest to, że liczba składników  $[(t - t_0)/h] + 1$  rośnie znacząco przy wielkim  $t$ . Aby uniknąć tego problemu, dodaje się tylko ograniczoną liczbę składników  $N_i$  dla punktów

czasowych ze skończonego przedziału  $[t - \Delta, t]$  z „niedawnej przeszłości” (rys.6).

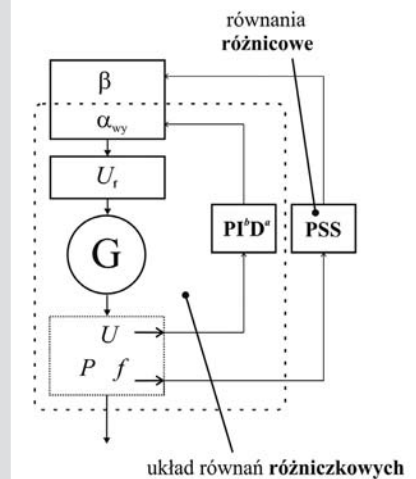
Algorytm wynikający z równania (28) tworzy się za pomocą definicji (26) zarówno dla zastosowania technicznego, jak i realizacji numerycznej, gdy uwzględnia się składniki  $N_i$  tej sumy. Z fizycznego punktu widzenia liczba składników  $N_i$  powinna zależeć od szybkości zmian napięcia, np. można przyjąć  $c = 20$  próbek w okresie czasu  $T = 1/f_s$  wraz z pewną liczbą  $n$  okresów czasu  $T$  ( $c$  wybiera się na podstawie doświadczenia i może być większa lub mniejsza niż 20). Algorytm ten w dziedzinie czasu (rys.6) przyjmuje prostą postać:

$$D^a f \approx h^{-a} \sum_{i=0}^{N_i} w_i f_i \quad (29)$$

gdzie:

$$w_i = -w_{i-1}(a - i)/(1 + i), \quad w_0 = 1, \quad h = \Delta/N_i$$

Należy podkreślić, że istnieje także możliwość stosowania regulacji napięcia według logiki rozmytej [8], ale artykuł ten jej nie dotyczy.



Rys. 7. Różniczkowo-różnicowy model układu generatora, regulatora napięcia i stabilizatora

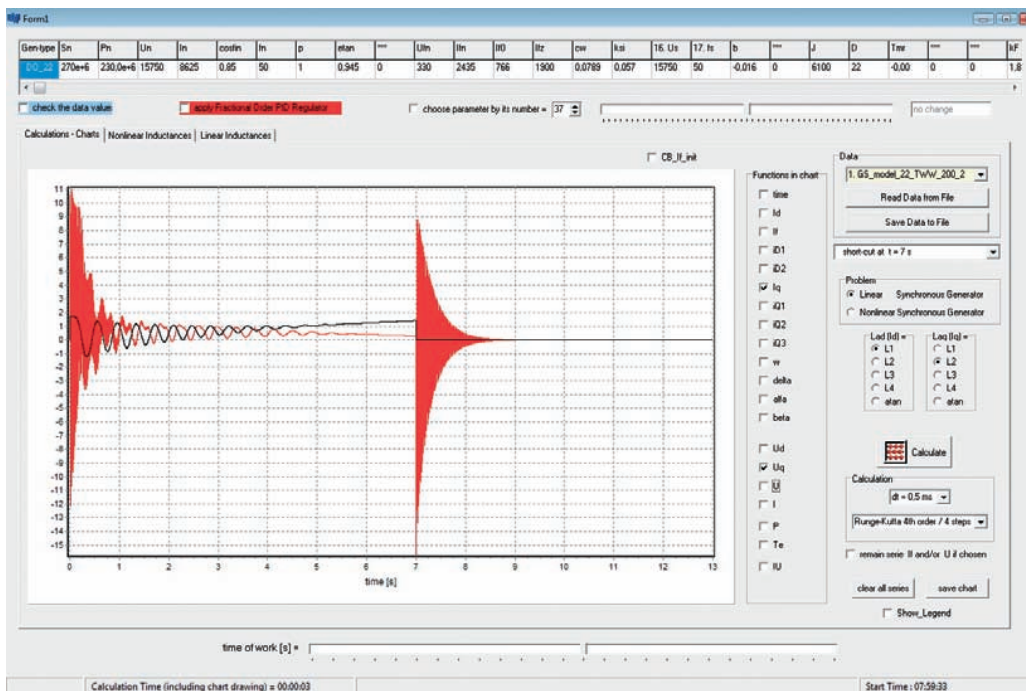
#### 1.4. Stabilizator mocy

Stabilizatory systemowe (sygnal wyjściowy  $\beta$ ) można projektować za pomocą różnych sposobów [9, 10, 11]. Stabilizatory systemu elektroenergetycznego z dwoma wejściami (częstotliwość, moc) zaleca się instalować na generatorach synchronicznych o mocy ponad 100 MW. Matematyczny opis stabilizatora zależy od sposobu jego realizacji technicznej i zwykle podany jest w postaci układu równań różnicowych, jak pokazano na rys. 7.

#### 2. Analiza numeryczna

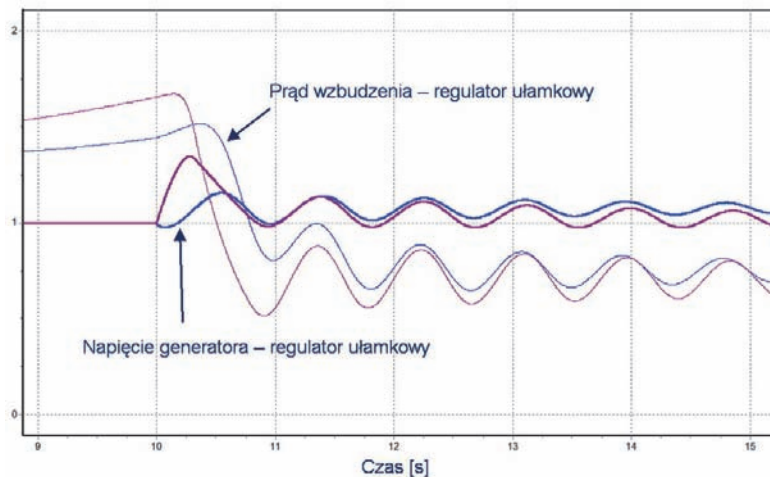
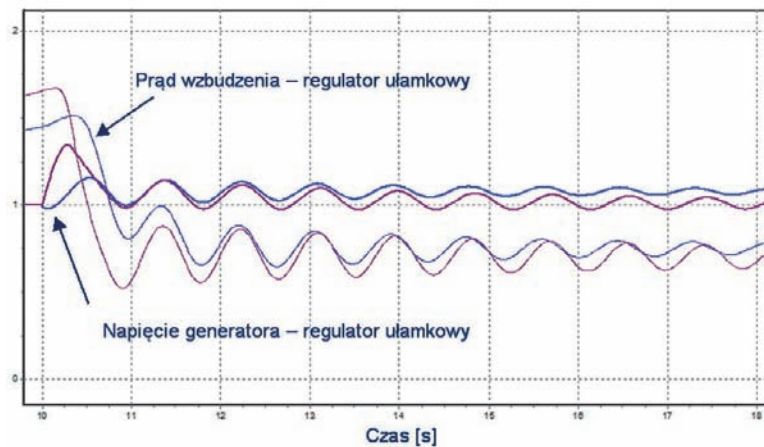
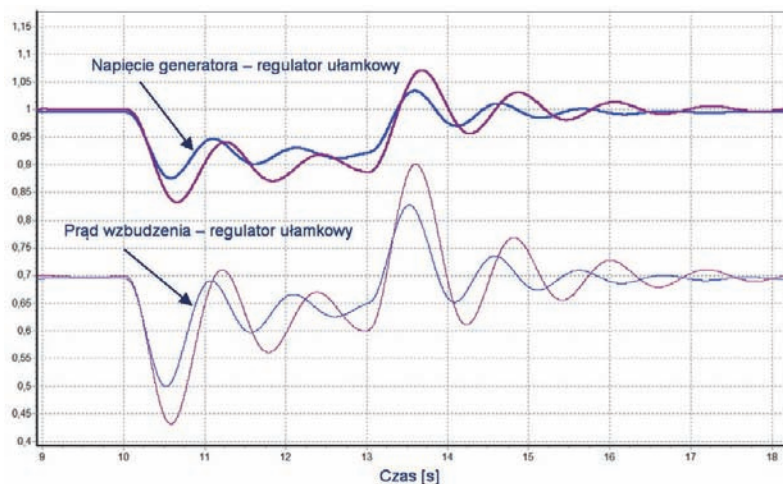
##### 2.1. Program numeryczny

Do badania cech modeli i ich wrażliwości na niektóre parametry opracowano



Rys. 8. Podstawowa forma programu (dostępna na <http://www.elekr.polsk.pl/dspalek/>)



Rys. 9. Zrzut mocy biernej. Prąd wzbudzenia  $I_f$  i napięcie generatora  $U$  (obwód liniowy)Rys. 10. Zrzut mocy biernej. Prąd wzbudzenia  $I_f$  i napięcie generatora  $U$  (obwód nieliniowy)Rys. 11. Zmiana ustawienia napięcia  $\pm 10\%$ . Prąd wzbudzenia  $I_f$  i napięcie generatora  $U$  (obwód liniowy)

program numeryczny dostępny na stronie: <http://www.elekr.polsl.pl/dspalek> (rys. 8).

## 2.2. Model numeryczny generatora synchronicznego

Program ten pozwala wybrać zestaw parametrów istotnych dla symulacji na modelach (1,1), (2,2) i (3,3) dotyczących nieliniowości obwodu magnetycznego. Program ten może badać wrażliwość każdego parametru modelu generatora synchronicznego na stany nieustalone. Program ten uwzględnia również przyjęty rodzaj regulatora napięcia, tzn. klasyczny PID lub ułamkowy  $PI^bD^a$ .

Wyniki wykonanej przez ten program symulacji określają, który model oraz jakie parametry i regulatory zapewniają odpowiednią pracę całego systemu.

Przykładowo analizowano następujące wybrane stany nieustalone generatora synchronicznego:

- zrzut mocy biernej
- zmiana zadanego napięcia
- zwarcie symetryczne.

Uwzględniono model liniowy i nieliniowy typu (2,2) generatora synchronicznego TWW-200-2, przy następujących parametrach modelu:  $S_n = 270$  MVA,  $P_n = 230$  MW,  $U_n = 15,75$  kV,  $I_n = 8625$  A,  $\cos\varphi_n = 0,85$ ,  $f_n = 50$  Hz,  $p = 1$ ,  $U_{fn} = 330$  V,  $I_{fn} = 2435$  A,  $I_{f0} = 766$  A,  $I_{fz} = 1900$  A,  $kF = 1,8$ .

Regulator PID:  $K = 0$ ,  $T_I = 3$  s,  $T_D = 0,1$  s.

Ustawienia regulatora ułamkowego  $PI^bD^a$ :  $a = 0,5$ ,  $b = 0$ ,  $T_a = 0,001$  s.

Parametry liniowego modelu typu (2,2) generatora (dla jednostki systemowej):  $L_{ad} = 2,48$ ,  $L_{aq} = 2,48$ ,  $L_s = 0,139$ ,  $R = 0,001676$ ,  $L_{sf} = 0,139$ ,  $R_f = 0,001128$ ,  $L_{D1} = 0,06$ ,  $R_{D1} = 0,0004046$ ,  $L_{sf1} = 0$ ,  $L_{D2} =$  nieskończoność,  $R_{D2} =$  nieskończoność,  $L_{sf2} = 0$ ,  $L_{Q1} = 0,332$ ,  $R_{Q1} = 0,011$ ,  $L_{smf1} = 0$ ,  $L_{Q2} = 0,112$ ,  $R_{Q2} = 0,024$ ,  $L_{smf2} = 0$ ,  $L_{Q3} =$  nieskończoność,  $R_{Q3} =$  nieskończoność.

Krzywe magnesowania wybrane dla nieliniowego modelu generatora przedstawiono na rys. 3.

Parametry wzbudzenia:  $T_{w1} = 0,1$  s,  $T_{w2} = 0,2$  s

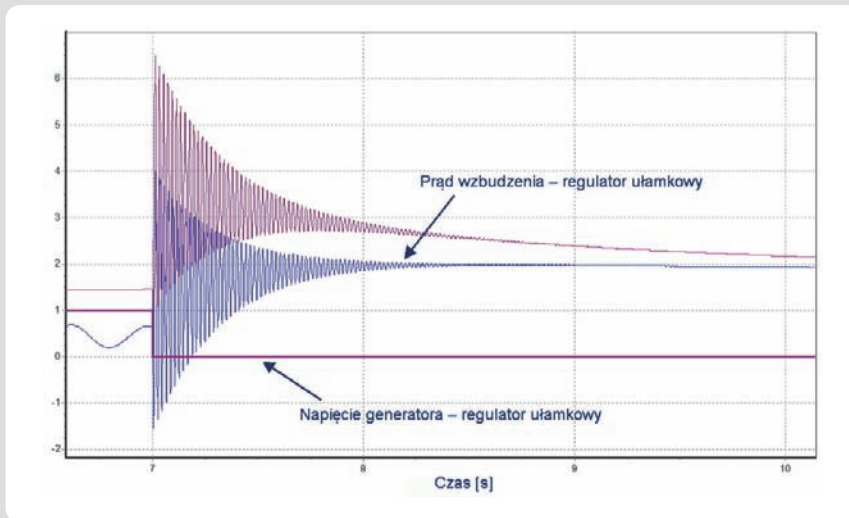
Generator synchroniczny wyposażony w regulator napięcia PID (sygnał wyjściowy dany przez pochodną pierwszego rzędu, całkę i uchyb sygnału wejściowego) można zastąpić regulatorem ułamkowym. Przedstawione tu stany pracy potwierdzają, że regulatory napięcia rzędu ułamkowego  $PI^bD^a$  można stosować do generatorów synchronicznych.

Należy jednak podkreślić, że nie wszystkie uzyskane stany nieustalone były zadowalające!

W celu zbadania pracy regulatora napięcia  $PI^bD^a$  opracowuje się model generatora synchronicznego.

Oparty na tym modelu algorytm numeryczny pozwala opisać wpływ parametrów regulatora napięcia na stany nieustalone generatora synchronicznego.





Rys.12. Zwarcie symetryczne. Prąd wzbudzenia  $I_f$  i napięcie generatora  $U$  (obwód liniowy)

### 3. Wnioski

Opracowano model obwodów generatora synchronicznego wyposażonego w regulator napięcia rzędu ułamkowego  $PI^0D^a$ :

- uwzględniono nieliniowość,
- analizowano model typu (2,2)
- klasyczny regulator napięcia PID porównano w szerokim zakresie z modelem regulatora rzędu ułamkowego  $PD^a$ .

Autorski program dostępny na stronie: <http://www.elekt.polsl.pl/dspalek/> jest nieustannie aktualizowany [12, 13, 14, 15, 16].

Podejścia zastosowane w opisującym model algorytmie uwzględniają wpływ parametrów ułamkowego regulatora napięcia na stany nieustalone generatora synchronicznego. Analizę tę należy rozwijać w przyszłości.

### Bibliografia

- Adkins B., Harley P.G., The general theory of alternating current machine, Chapman and Hall, Londyn 1978.
- Paszek W., Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT 1984.
- Latek W., Turbogeneratory, WNT 1973.
- Janson Z. i in., ETEF 200C – Mikroprocesorowy układ wzbudzenia generatora 200 MW, *Energetyka* 1997, s. 199–204.
- Berhausen S., Paszek S., Estymacja parametrów modelu generatora synchronicznego pracującego w wielomaszynowym systemie elektroenergetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny* 2011, nr 8, s. 192–197.
- Paszek S. i in., Pomiarowa estymacja parametrów dynamicznych generatorów synchronicznych i układów wzbudzenia pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym, Politechnika Śląska, Gliwice, 2013.
- Shantanu Das, Functional Fractional Calculus, ISBN 978-3-642-20544-6 Springer Verlag, 2011.
- Barbos de J. C., New optimal fuzzy-PID controller structure, Proceedings of ICEM 2002, Brugia 2002, s. 216.
- Robak S., Hierarchiczne sterowanie napięcia wzbudzenia generatora synchronicznego, *Archiwum Energetyki* 2000, tom XXIX, nr 1–2, s. 89–109.
- Gładys H., Matla H., Praca elektrowni w systemie elektroenergetycznym, WNT 1999.
- Mello de F.P., Hannet L.N., Undrill J.M., Practical approaches to supplementary stabilising from accelerating power, IEEE Transaction, tom PAS-97, 1978, s. 1515–1522.
- Spalek D., Analysis of excitation system modified for power station generator. Proceedings of ICEM 2000, tom II, Helsinki 2000, s. 977–981.
- Spalek D., Turbogenerator as a electro-mechanical converter – transient states, Symposium PPEE 2000, Wisła 2000, s. 295–300.
- Spalek D., Approach to synchronous generator with power system stabilizer described by difference-differential equations, XIV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce”, tom I, Jurata 2009, s. 247–258.
- Spalek D., Synchronous generator model sensitivity to parameters for transients approach, APE 2011, tom I, s. 203–212.
- Spalek D., Synchronous generator model with nonlinear magnetic circuit, Proceedings of Conference APE 2013, *Acta Energetica* 2013, nr 4/17, s. 143–157.

### Dariusz Spalek

prof. dr hab. inż.  
Politechnika Śląska w Gliwicach  
e-mail: Dariusz.Spalek@polsl.pl

Absolwent Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Pracuje na Wydziale Elektrycznym swojej macierzystej uczelni (mgr inż. – 1988, dr – 1994, dr hab. – 2002, tytuł profesora – 2010). Stypendysta Fundacji DAAD na Technische Universität Erlangen-Nürnberg (Niemcy, 1996). Odbił staż przemysłowy w PUE Energotest-Energopomiar w Gliwicach oraz Energotest-Gdańsk sp. z o.o. w Gdańsku (1999–2007). Brał udział w pracach modernizacyjnych układów wzbudzenia i stabilizatorów systemowych dla generatorów, m.in. w elektrowniach: Dolna Odra, Łaziska, Rybnik, Koźienice, Pątnów. Jest autorem 80 publikacji naukowych, 2 monografii i 2 podręczników akademickich oraz współautorem 70 publikacji i 2 podręczników.