

Power System State Estimation in Polar Coordinate System. Significance of Specific Information on Symmetrical Phase Shifter

Authors

Kazimierz Wilkosz
Tomasz Okoń

Keywords

phase shifter, power system, state estimation

Abstract

Power system state estimation is a calculation procedure, which plays an essential role in computer systems in national control centres. Time of realization of the estimation calculation should be as short as possible. Accuracy of results of the estimation should be as large as possible. Sensitivity to errors burdening data utilized in the state estimation should be as small as possible. The paper considers the state estimation of a power system with a symmetrical phase shifter. That phase shifter is modelled using a general model of the phase shifter and using specific information on the symmetrical phase shifter. The paper describes original investigations of features of the power system state estimation in both the mentioned cases. Investigations show essential difference between features of the state-estimation for those cases.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2018109

Received: 02.08.2017

Accepted: 22.08.2017

Available online: 31.08.2018

1. Introduction

Power system state estimation [1] is a calculation procedure, which plays an essential role in computer systems in national control centres. It is the central part of real-time power-system modelling, of which results are the topology model and the state vector of a power system. It is evident that the correct model of a power system is necessary for the correct implementation of the power system state estimation.

In the paper, one considers features of the power system state estimation when in this power system there is a symmetrical phase-shifter [2–4]. The symmetrical phase-shifter is one of the phase-shifter solutions [5–7]. For that device: (i) the magnitude of the output voltage is the same as the magnitude of the supply voltage, (ii) the vector of the output voltage is shifted in phase with respect to the the mentioned supply voltage.

For the purposes of the state-estimation process, the symmetrical phase shifter can be modelled as other phase shifters. There is possibility of taking into consideration the specific feature of the symmetrical phase shifter, as well. The paper is aimed at the answer to the question what are differences between features of the power-system state estimation in both the distinguished

cases, when the state estimation is realized in the polar coordinate system.

2. Power-system state estimation method

In the paper, one takes into account the weighted least squares power-system state estimation method, which assumes minimization of the function [1]:

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (1)$$

where: \mathbf{x} is a power-system state vector; \mathbf{z} is a vector of measurements; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ is a vector of so-called measurement functions, representing dependence of measured quantities from state vector \mathbf{x} ; \mathbf{R} is a diagonal matrix of measurement covariances.

Vector \mathbf{x} in the polar coordinate system is defined as:

$$\mathbf{x} = [\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n, V_1, V_2, \dots, V_n]^T \quad (2)$$

where: V_l $l = 1, 2, \dots, n$ are magnitudes of voltages at buses $1, 2, \dots, n$; δ_i $i = 2, 3, \dots, n$ are phase angles of the voltages at buses $2, 3, \dots, n$.

The elements of vector $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ are defined with the use of the appropriate formula from among the following ones [8, 9]:

$$V_i = V_j \tag{3}$$

$$P_i - jQ_i = \bar{\mathbf{V}}_i^* \mathbf{Y}_{row i} \mathbf{V} \tag{4}$$

$$P_{ij} - jQ_{ij} = \left[-(\bar{\mathbf{v}}_{si} + \bar{\mathbf{v}}_{ij}) \quad \bar{\mathbf{y}}_{ij} \right] \left[V_i^2 \quad \bar{\mathbf{V}}_j \cdot \bar{\mathbf{V}}_i^* \right]^T \tag{5}$$

where: P_i, Q_i are an active and reactive power injection at i -th bus, respectively; P_{ij}, Q_{ij} are an active and reactive power flow, respectively, between i -th and j -th bus, measured at i -th bus; $\bar{\mathbf{V}}_i$ is a voltage at i -th bus; $\bar{\mathbf{y}}_{ij}$ is an admittance of the series branch connecting i -th and j -th bus; $\bar{\mathbf{y}}_{si}$ is an admittance of the shunt branch at i -th bus; $\mathbf{Y}_{row i}$ is i -th row of an admittance matrix:

$$\mathbf{Y}_{row i} = [\bar{\mathbf{y}}_{i1}, \bar{\mathbf{y}}_{i2}, \dots, \bar{\mathbf{y}}_{in}] \tag{6}$$

$$\mathbf{V} = [\bar{\mathbf{V}}_1, \bar{\mathbf{V}}_2, \dots, \bar{\mathbf{V}}_n]^T \tag{7}$$

In the estimation calculations the normal-equation set is solved:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) \cdot (\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k) = -\mathbf{g}(\mathbf{x}^k) \tag{8}$$

where: k is a number of iteration, \mathbf{x}^k is a solution vector at the k -th iteration,

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{x}^k) \tag{9}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \tag{10}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -\mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \tag{11}$$

$\mathbf{G}(\mathbf{x})$ is called a gain matrix.

In the paper, one considers the features of power-system state estimation characterized by [8]:

- a number of iterations (L_{it})
- a condition number of the gain matrix ($\text{cond}(\mathbf{G})$)
- a ratio J_e/J_m [10], where:

$$J_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [(z_i - z_i^r)/\sigma_i]^2, \quad J_e = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [(\hat{z}_i - z_i^r)/\sigma_i]^2, \quad z_p, \hat{z}_p, z_i^r$$

are the measured, estimated and real value of the i -th measured quantity, respectively.

For ratio J_e/J_m , the following condition should be satisfied:

$$\frac{J_e}{J_m} < 1 \tag{12}$$

If condition (12) is not satisfied, then accuracy of results of estimation is assessed as insufficient.

The values of the considered indices should be as small as possible. The above-given indices are taken into consideration in the investigations, which are described in this paper.

For the purposes of the investigations the condition number of the gain matrix is defined as:

$$\text{cond}(\mathbf{G}) = \frac{\lambda_M}{\lambda_m} \tag{13}$$

where λ_m, λ_M are the minimal and maximal eigenvalues of \mathbf{G} matrix, respectively.

Condition number $\text{cond}(\mathbf{G})$ characterizes sensitivity to errors burdening data used in the estimation process.

3. Symmetrical phase shifter

In general, an equivalent circuit of the phase shifter is presented in Fig. 1 [5–6]. In that circuit, there are distinguished: a shunt Excitation Transformer (ET), a series Boosting Transformer (BT) injecting a series voltage ($\bar{\mathbf{V}}_{BT}$) in a power system, and a tap changer. The tap changer controls voltage $\bar{\mathbf{V}}_{BT}$. In the conventional phase shifter, mechanical switches are usually embedded with the ET transformer. In the modern phase shifter, mechanical switches are replaced by semiconductor ones.

The symmetrical phase shifter is a type of the phase shifter, which allows obtaining the magnitude of the output voltage to be equal to the magnitude of the supply voltage and the vector

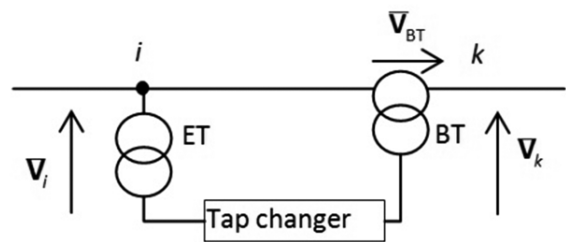


Fig. 1. An equivalent circuit of the phase shifter

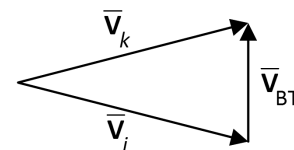


Fig. 2. Phasor diagram for the symmetrical phase shifter

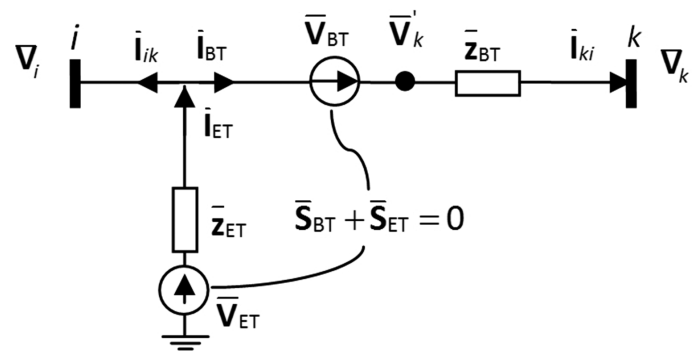


Fig. 3. The assumed model for the symmetrical phase shifter

of the output voltage is shifted in phase with respect to the the mentioned supply voltage (Fig. 2).

A model of the symmetrical phase shifter, to be assumed in the paper, is shown in Fig. 3. The model consists of two controllable voltage sources (as it is in [9]). Their internal impedances $\bar{\mathbf{z}}_{ET}$ and $\bar{\mathbf{z}}_{BT}$ represent impedances of transformers ET and BT, respectively. For the model from Fig. 3, the following equations can be derived:

$$\bar{\mathbf{S}}_{ik}^* = -V_i^2(\bar{\mathbf{y}}_{ET} + \bar{\mathbf{y}}_{BT}) + \bar{\mathbf{V}}_k \bar{\mathbf{V}}_i^* \bar{\mathbf{y}}_{BT} - \bar{\mathbf{V}}_{BT} \bar{\mathbf{V}}_i^* \bar{\mathbf{y}}_{BT} + \bar{\mathbf{V}}_{ET} \bar{\mathbf{V}}_i^* \bar{\mathbf{y}}_{BT} \quad (14)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{ki}^* = -V_k^2 \bar{\mathbf{y}}_{BT} + \bar{\mathbf{V}}_i \bar{\mathbf{V}}_k^* \bar{\mathbf{y}}_{BT} + \bar{\mathbf{V}}_{BT} \bar{\mathbf{V}}_k^* \bar{\mathbf{y}}_{BT} \quad (15)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{BT}^* = V_{BT}^2 \bar{\mathbf{y}}_{BT} + \bar{\mathbf{V}}_i \bar{\mathbf{V}}_{BT}^* \bar{\mathbf{y}}_{BT} - \bar{\mathbf{V}}_k \bar{\mathbf{V}}_{BT}^* \bar{\mathbf{y}}_{BT} \quad (16)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{ET}^* = V_{ET}^2 \bar{\mathbf{y}}_{ET} - \bar{\mathbf{V}}_i \bar{\mathbf{V}}_{ET}^* \bar{\mathbf{y}}_{ET} \quad (17)$$

Neglecting phase-shifter losses, we can state that the phase shifter cannot absorb and injects complex power, i.e. the complex power supplied to the excited transformer equals to the complex power demanded by the boosting transformer:

$$\bar{\mathbf{S}}_{ET} + \bar{\mathbf{S}}_{BT} = 0 \quad (18)$$

Bus powers $\bar{\mathbf{S}}_{i-AC}$ and $\bar{\mathbf{S}}_{k-AC}$ calculated from (4), are updated as follows:

$$\bar{\mathbf{S}}_i = \bar{\mathbf{S}}_{i-AC} - \bar{\mathbf{S}}_{ik} \quad (19)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_k = \bar{\mathbf{S}}_{k-AC} - \bar{\mathbf{S}}_{ki} \quad (20)$$

Equations (14–20) concern the phase shifter independently of relation between the magnitudes of the output voltage and the supply one. If the phase shifter is a symmetrical one and the case of utilization of polar coordinate system is considered, the further constraint should be taken into account:

$$V_i - V_k = 0. \quad (21)$$

4. The performed investigations

4.1. Assumptions

1. The IEEE 14-bus test system (Fig. 4) is used.
2. For purposes of the investigations, the IEEE 14-bus test system is modified. In that system, there is a symmetrical phase shifter. The symmetrical phase shifter is in series with the line, being between bus 5 and bus 4 in the original test system. The symmetrical phase shifter is at bus 5.
3. 11 load variants are considered. For the given variant, each active and reactive load and also power injection is defined as: $W = 0,5W_b + l \cdot W_b$, where W , W_b are the calculated and base values of one of the mentioned quantity; $l \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$. $V^{0.5+l}$ stands for the variant associated with l .

4. For each load variant, the phase shift introduced by the symmetrical phase shifter is in the range $[-20^\circ, 20^\circ]$ (as it is for the Polish phase shifters).
5. One takes into account four levels of data redundancy, i.e.: r_1 , r_2 , r_3 , and r_4 , where $r_1 = 1.1$ (34 measurements), $r_2 = 1,7$ (53 measurements), $r_3 = 2.2$ (68 measurements), $r_4 = 3,6$ (104 measurements).
6. For each level of data redundancy, 100 different locations of measurement systems is randomly generated.
7. Each measurement is burden with a small error characterized by the Gaussian distribution with a mean equal to 0 and a standard deviation σ , defined as [12, 13]:
 $\sigma = 1/3[(0,001 + 0,0025)FS + 0,02M]$ for active power;
 $\sigma = 1/3[(0,001 + 0,005)FS + 0,02M]$ for reactive power and
 $\sigma = 1/3[(0,0005 + 0,0025)FS + 0,003M]$ for voltage magnitude, where FS is a measurement scope, M is a measured value.
8. The state estimation is the weighted least squares one.
9. A state vector is found with the use of the normal equations.
10. State estimation calculations are performed in the polar coordinate system.
11. There are considered:
 - 1) SE_Ph, i.e. the state estimation of a power system with the symmetrical phase shifter modeled using the general model for phase shifter depicted in Fig. 3
 - 2) SE_SY, i.e. estimation SE_Ph with considering specific information on the symmetrical phase shifter, which is contained in relationship (21).

4.2. Results

Results of the investigations are shown in Fig. 5–10 and in Tab. 1–6.

In figures Fig. 5–10 there are presented values of the considered indices characterizing features of the state estimation, i.e. L_{it} , $\text{cond}(\mathbf{G})$, ratio J_e/J_m . Those values are sorted in order of decreasing. For any point of a curve, in Fig. 5–10, an ordinate is the value of the considered index to be not larger than other values determined for cases of the state estimation, of which number is given by the abscissa (expressed as a percentage of all cases).

Tables 1–6 contain parameters of the considered indices (L_{it} , $\text{cond}(\mathbf{G})$, ratio J_e/J_m) for different conditions of realization of the state estimation. These parameters are: the minimum, maximum, mean values and standard deviations.

Results in Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9 and in Tab. 1, Tab. 3, Tab. 5 have been obtained for load variant $V^{0.5}$, and in Fig. 6, Fig. 8, Fig. 10 and in Tab. 2, Tab. 4, Tab. 6 – for load variant $V^{1.5}$.

Figures 5–6 show, that for SE_SY curves presenting values of L_{it} versus the number of cases of estimation calculations are above the corresponding curves for SE_PhS. That fact means that if we consider cases of estimation calculation for which L_{it} is not smaller than the selected value, then the number of cases of SE_SY calculations is larger than the number of cases of SE_PhS calculations. Other situation is for indices $\text{cond}(\mathbf{G})$ and ratio J_e/J_m . Figures 7–10 show, that for SE_PhS curves presenting values of those indices versus the number of cases of estimation calculations are above the corresponding curves for SE_SY. That ascertainment means,

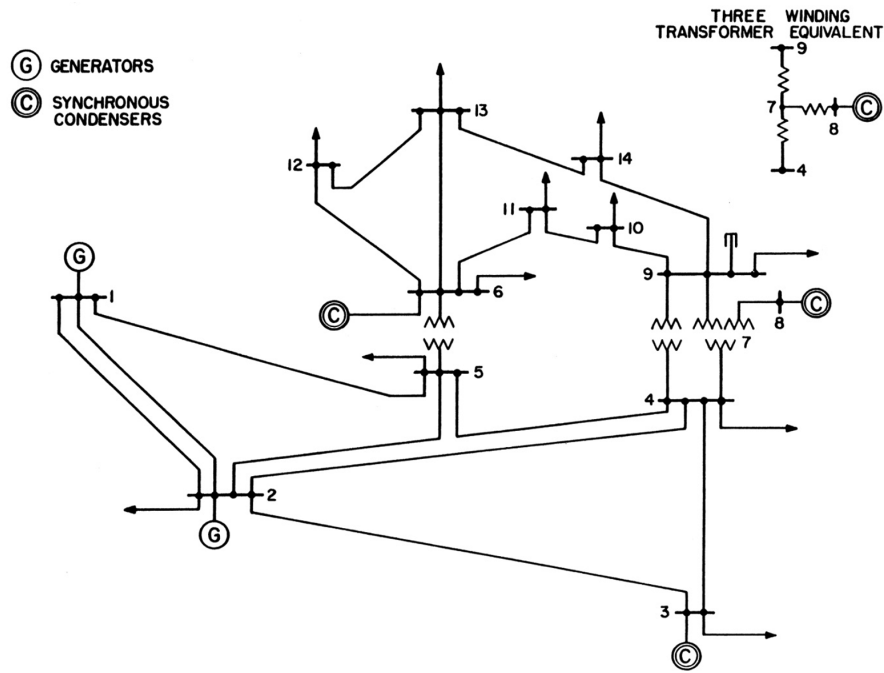


Fig. 4. The IEEE-14-bus test system [11]

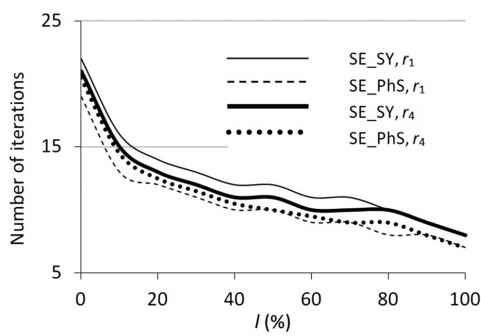


Fig. 5. The number of iterations in the state-estimation process for load variant $V^{0.5}$

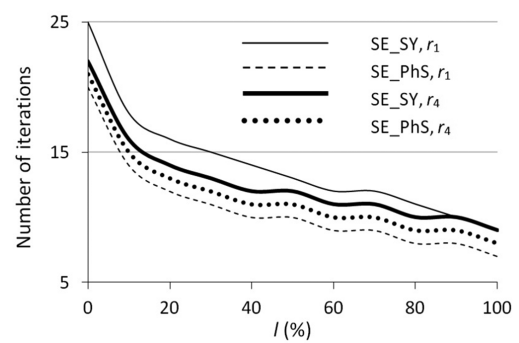


Fig. 6. The number of iterations in the state-estimation process for load variant $V^{1.5}$

level of data redundancy	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min	7	7	7	7	8	8	8	8
max	19	20	20	21	22	22	22	21
mean	10.18	10.77	10.70	10.90	12.19	11.75	11.61	11.46
standard deviations	2.37	2.47	2.49	2.55	2.636	2.54	2.46	2.35

Tab. 1. Parameters of the number of iterations for load variant $V^{0.5}$

level of data redundancy	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min	7	7	7	7	9	9	9	8
max	20	20	21	21	25	24	23	22
mean	10.19	10.96	10.87	11.36	13.54	12.76	12.71	12.46
standard deviations	2.48	2.54	2.49	2.58	3.03	2.73	2.69	2.53

Tab. 2. Parameters of the number of iterations for load variant $V^{1.5}$

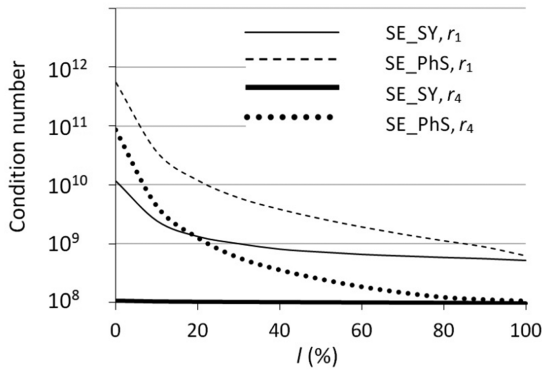


Fig. 7. The condition number in the state-estimation process for load variant $V^{0.5}$

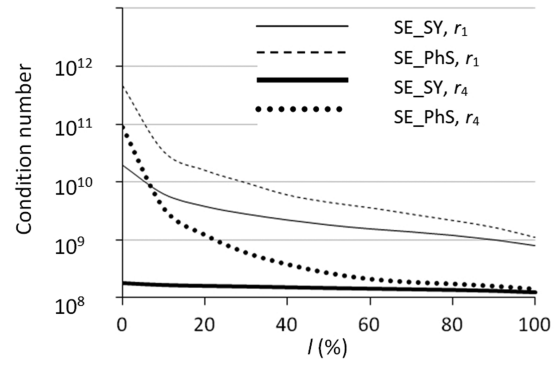


Fig. 8. The condition number in the state-estimation process for load variant $V^{1.5}$

level of data redundancy	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min	5.9E+08	2.2E+08	1.5E+08	1.0E+08	5.1E+08	2.0E+08	1.2E+08	9.7E+07
max	5.5E+11	2.2E+11	1.7E+11	8.6E+10	1.2E+10	1.1E+09	2.8E+08	1.1E+08
mean	1.8E+10	6.0E+09	5.1E+09	2.7E+09	1.2E+09	2.6E+08	1.4E+08	1.0E+08
standard deviations	5.6E+10	2.1E+10	1.9E+10	1.1E+10	1.4E+09	1.1E+08	1.8E+07	1.9E+06

Tab. 3. Parameters of the condition number for load variant $V^{0.5}$

level of data redundancy	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min	1.0E+09	3.5E+08	2.3E+08	1.4E+08	7.8E+08	2.8E+08	1.8E+08	1.2E+08
max	4.6E+11	2.2E+11	1.6E+11	8.8E+10	2.0E+10	2.6E+09	7.4E+08	1.8E+08
mean	1.7E+10	6.4E+09	4.5E+09	2.6E+09	3.0E+09	5.8E+08	2.8E+08	1.5E+08
standard deviations	4.2E+10	2.0E+10	1.6E+10	9.9E+09	3.3E+09	3.6E+08	8.2E+07	1.2E+07

Tab. 4. Parameters of the condition number for load variant $V^{1.5}$

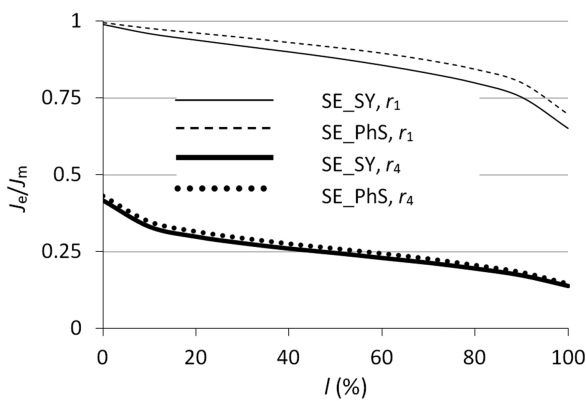


Fig. 9. Ratio J_e/J_m in the state-estimation process for load variant $V^{0.5}$

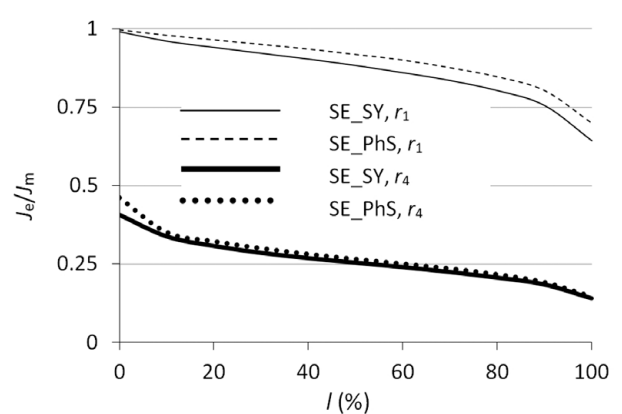


Fig. 10. Ratio J_e/J_m in the state-estimation process for load variant $V^{1.5}$

that now if we consider cases of estimation calculation for which $\text{cond}(\mathbf{G})$ or ratio J_e/J_m is not smaller than the selected value, then the number of cases of SE_SY calculations is smaller than the number of cases of SE_PhS calculations.

One can ascertain that L_{it} takes values to be more favorable for SE_PhS than for SE_SY and indices $\text{cond}(\mathbf{G})$ and J_e/J_m take values

to be more favorable for SE_SY than for SE_PhS. That qualitative conclusion is confirmed by analysis of values given in Tab. 1–6.

Analyses of data from Tab. 1 and 2 reveal that for SE_SY almost all parameters of L_{it} are not smaller than for SE_PhS. The exceptions are the standard deviations for:

level of data redundancy	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min	0.66	0.32	0.22	0.13	0.61	0.30	0.21	0.13
max	1.00	0.77	0.62	0.43	0.99	0.74	0.60	0.42
mean	0.90	0.54	0.41	0.26	0.87	0.52	0.39	0.25
standard deviations	0.07	0.09	0.08	0.06	0.08	0.09	0.08	0.06

Tab. 5. Parameters of the ratio J_e/J_m for load variant $V^{0.5}$

level of data redundancy	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min	0.66	0.31	0.23	0.13	0.61	0.29	0.22	0.13
max	1.00	0.77	0.63	0.46	0.99	0.74	0.61	0.41
mean	0.90	0.55	0.42	0.27	0.87	0.53	0.41	0.26
standard deviations	0.07	0.09	0.08	0.06	0.08	0.09	0.08	0.06

Tab. 6. Parameters of the ratio J_e/J_m for load variant $V^{1.5}$

- 1) data redundancy r_3 and load variant $V^{0.5}$
- 2) data redundancy r_4 and load variants $V^{0.5}$ and $V^{1.5}$.

Tables Tab. 3 and 4 show that all parameters of $\text{cond}(\mathbf{G})$ are smaller for SE_SY than for SE_PhS. Analysing Tab. 5 and 6, one can ascertain that only the standard deviations of ratio J_e/J_m for data redundancy r_1 and load variants $V^{0.5}$ and $V^{1.5}$ are larger for SE_SY than for SE_PhS.

Comparing parameters of the distinguished indices for SE_SY and SE_PhS, one can observe that the largest differences are for $\text{cond}(\mathbf{G})$. Taking into account the mean value, those differences are from -96.24% to -93.42% for load variant $V^{0.5}$ and from -94.37% to -82.02% for load variant $V^{1.5}$. Smaller differences of parameters are for L_{it} . For the mean value, they are from 5.23% to 19.85% for load variant $V^{0.5}$ and from 9.68 to 32.84% for load variant $V^{1.5}$. The smallest differences of parameters are for ratio J_e/J_m . Considering the mean value, they are from -4.96% to -3.77% for load variant $V^{0.5}$ and from -4.60% to -3.80% for load variant $V^{1.5}$.

The earlier-presented values of differences of the mean values are the relative ones and they are calculated using the formula:

$$p_{r\%} = 100 \frac{p_{SY} - p_{PhS}}{p_{PhS}} \quad (22)$$

where p_{SY} , p_{PhS} are values of parameter p (i.e. the mean value) of the considered index for SE_SY and SE_PhS, respectively.

5. Conclusions

In the state estimation of a power system with a phase shifter, it is possible to consider specific features of the phase shifter or not. In the paper, the estimation process in the first case is called as SE_SY, and in the second one – SE_PhS. In the paper, one considers one of phase shifter solutions, which is the symmetrical phase shifter. The conducted investigations show that from the point of view of such indices characterising features of the power system state estimation as condition number of the gain matrix $\text{cond}(\mathbf{G})$

and ratio J_e/J_m , taking into account specific features of the phase shifter (i.e. the symmetrical phase shifter) allows improving features of the estimation calculations realized in the polar coordinate system. In general, minimum, maximum, mean values and standard deviations of $\text{cond}(\mathbf{G})$ and ratio J_e/J_m are more favorable for SE_SY. The conducted investigations enable to ascertain that in each case the mentioned indices are smaller for SE_SY. Taking into account number of iterations L_{it} , one can note that situation is other. Values of L_{it} are larger for SE_SY than for SE_PhS.

Analyzing parameters of taken into account indices (L_{it} , $\text{cond}(\mathbf{G})$ and ratio J_e/J_m), especially large difference are observed between mean values of index $\text{cond}(\mathbf{G})$ for SE_SY and SE_PhS. The noticeable difference is between mean values of number of iterations L_{it} for different consideration of specific features of the phase shifter, but in this case SE_SY is less favourable than SE_PhS. Relatively small difference is for mean values of index J_e/J_m calculated for SE_SY and SE_PhS.

In the final conclusion, the conducted investigations give the base to ascertainment that consideration of specific features of the phase shifter decreases sensitiveness to errors burdening measurement data and increases accuracy of the results, but also increases the number of iterations in the power system state estimation process in the polar coordinate system.

REFERENCES

1. Schweppe C., Wildes J., "Power System Static-State Estimation", Part I–III, *IEEE Trans. PAS*, Vol. 89, No. 1, 1970, pp. 120–135.
2. Arrillaga J., Duke R.M., "Thyristor-controlled quadrature boosting", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 126, No. 6, 1979, pp. 493–498.
3. Zhu M., Dale L.A., "Application and modelling of quadrature boosters for the HV transmission system", *Proc. Int. Conf. Power System Technology (POWERCON)*, Aug. 1998, pp. 923–927.

4. Gabrijel A., B. Mihalic, "Phase-shifting transformers in a structure-preserving energy function", *Electric Power Systems Research*, Vol. 74, No. 2, May 2005, pp. 323–330.
5. Iravani M.R., Maratukulam D., "Review of semiconductor-controlled (static) phase shifters for power systems applications", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, 1994, pp. 1833–1839.
6. Okon T., Wilkosz K., "Phase shifter models for steady state analysis", Proc. 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2016, pp. 1–6.
7. Verboomen J. et al., "Phase shifting transformers: principles and applications", Proc. 2005 International Conference on Future Power Systems, 2005, pp. 1–6.
8. Okoń T., Wilkosz K., "Comparison of weighted-least-squares power system state estimation in polar and rectangular coordinate systems", Proc. 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2010, pp. 140–143.
9. Okoń T., Wilkosz K., "WLS state estimation in polar and rectangular coordinate systems for power system with UPFC: Significance of types of measurements", Proc. Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010, pp. 1–6.
10. Acha E., FACTS: "Modelling and simulation in power networks", Chichester: Wiley, 2004.
11. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
12. Dopazo J. et al., "State Calculation of Power Systems From Line Flow Measurements", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-89, No. 7, Sep. 1970, pp. 1698–1708.
13. Dopazo J., Klitin O., VanSlyck L., "State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements", Part II, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-91, No. 1, Jan. 1972, pp. 145–151.

Tomasz Okoń

Wrocław University of Science and Technology

email: Tomasz.Okon@pwr.edu.pl

Involved in scientific activity with Faculty of Electrical Engineering of Wrocław University of Science and Technology (Wrocław, Poland), where he received a master's degree in engineering and a Ph.D. degree in technical sciences. He is a member of IEEE. He participated in a number of research projects related to the power system. His scientific interests are located in the area of modeling and analysis of the power system.

Kazimierz Wilkosz

Wrocław University of Science and Technology

email: Kazimierz.Wilkosz@pwr.edu.pl

In his scientific activity, associated with Wrocław University of Science and Technology (Wrocław, Poland). Member of SEP (Association of Polish Electrical Engineers), CIGRE, IEEE, Committee on Electrical Engineering of the Polish Academy of Sciences (PAN). Member of scientific committees of many national and international conferences. He carried out many research projects, including those financed by domestic industry partners (e.g. PSE, Tauron, EnergiaPro, KGHM) and foreign research projects (EPRI). His special areas of interest being at the same time of teaching and research are power system modeling and analysis, as well as computer systems in power engineering.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 88–94. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Estymacja stanu systemu elektroenergetycznego w biegunowym układzie współrzędnych. Znaczenie specyficznej informacji o symetrycznym przesuwniku fazowym

Autorzy

Kazimierz Wilkosz
Tomasz Okoń

Słowa kluczowe

przesuwnik fazowy, system elektroenergetyczny, estymacja stanu

Streszczenie

Estymacja stanu systemu elektroenergetycznego jest procedurą obliczeniową, która odgrywa istotną rolę w systemach komputerowych dyspozycji mocy. Czas realizacji obliczeń estymacyjnych powinien być możliwie najkrótszy. Dokładność wyników estymacji powinna być możliwie największa. Wrażliwość na błędy obciążające dane wykorzystywane w procesie estymacji stanu powinna być możliwie najmniejsza. Przedmiotem tego artykułu jest estymacja stanu systemu elektroenergetycznego z symetrycznym przesuwnikiem fazowym – uwzględniono estymację stanu, w której zastosowano ogólny model przesuwника fazowego oraz gdy pod uwagę bierze się także specyficzne informacje o przesuwniku. Artykuł zawiera wyniki oryginalnych badań obu tych przypadków – między nimi występują istotne różnice we właściwościach estymacji stanu.

Data wpływu do redakcji: 02.08.2017

Data akceptacji artykułu: 22.08.2017

Data publikacji online: 31.08.2018

1. Wstęp

Estymacja stanu systemu elektroenergetycznego [1] jest procedurą obliczeniową, która odgrywa istotną rolę w systemach komputerowych dyspozycji mocy. Jest to najważniejsza część modelowania systemu elektroenergetycznego w czasie rzeczywistym. Wyniki tego modelowania to model topologii i wektor stanu systemu elektroenergetycznego. Warunkiem koniecznym prawidłowej realizacji estymacji stanu jest poprawny model systemu elektroenergetycznego.

W artykule rozpatrywane są właściwości estymacji stanu systemu elektroenergetycznego, kiedy w tym systemie zastosowano symetryczny przesuwnik fazowy [2–4]. Jest on jednym z typów przesuwника fazowego [5–7], charakteryzuje się tym, że:

- 1) napięcie wyjściowe ma taki sam moduł jak napięcie zasilające
- 2) wektor napięcia wyjściowego jest przesunięty w fazie względem napięcia zasilającego.

Aby zrealizować cele procesu estymacji stanu, symetryczny przesuwnik fazowy może być modelowany jak inne przesuwniki fazowe. Istnieje także możliwość uwzględnienia specyficznych właściwości symetrycznego przesuwника fazowego.

W artykule, odnoszącym się do estymacji stanu systemu elektroenergetycznego w układzie współrzędnych biegunowych, szukamy odpowiedzi na pytanie dotyczące różnic pomiędzy właściwościami procesu estymacji stanu w obu przypadkach.

2. Metoda estymacji stanu systemu elektroenergetycznego

Do estymacji stanu systemu elektroenergetycznego przyjęto metodę ważonych najmniejszych kwadratów. Metoda

ta zakłada minimalizację następującej funkcji [1]:

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{x} – wektor stanu systemu elektroenergetycznego; \mathbf{z} – wektor pomiarów; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ – wektor funkcji (również nieliniowych) wektora \mathbf{x} , reprezentujący zależności mierzonych wielkości od wektora stanu; \mathbf{R} – macierz diagonalna kowariancji pomiarów. W układzie współrzędnych biegunowych wektor \mathbf{x} definiuje się jako:

$$\mathbf{x} = [\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n, V_1, V_2, \dots, V_n]^T \quad (2)$$

gdzie: V_i $i = 1, 2, \dots, n$ – napięcia w węzłach 1, 2, ..., n ; δ_i $i = 2, 3, \dots, n$ – kąty fazowe napięć w węzłach 2, 3, ..., n .

Elementy wektora $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ definiuje się za pomocą odpowiedniego wzoru spośród następujących [8, 9]:

$$V_i = V_i \quad (3)$$

$$P_i - jQ_i = \bar{\mathbf{V}}_i^* \mathbf{Y}_{row i} \mathbf{V} \quad (4)$$

$$P_{ij} - jQ_{ij} = [-(\bar{y}_{si} + \bar{y}_{ij}) \quad \bar{y}_{ij}] \cdot [V_i^2 \quad \bar{\mathbf{V}}_j \cdot \bar{\mathbf{V}}_i]^T \quad (5)$$

gdzie: P_p , Q_i – węzłowe moce czynna i bierna w i -tym węzle; P_{ij} , Q_{ij} – przepływy mocy czynnej i biernej między węzłami i -tym oraz j -tym przy węzle i -tym; V_i – napięcie w węzle i -tym; \mathbf{Y}_{ij} – admitancja wzdłużna gałęzi łączącej węzły i -ty z j -tym; \mathbf{Y}_{si} – admitancja poprzeczna w węzle i -tym; $\mathbf{Y}_{row i}$ – wiersz i -ty macierzy admitancyjnej:

$$\mathbf{Y}_{row i} = [\bar{y}_{i1}, \bar{y}_{i2}, \dots, \bar{y}_{in}] \quad (6)$$

$$\mathbf{V} = [\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_n]^T \quad (7)$$

W trakcie obliczeń estymacji stanu rozwiązywany jest układ równań normalnych:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) \cdot (\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k) = -\mathbf{g}(\mathbf{x}^k) \quad (8)$$

gdzie: k – numer iteracji, \mathbf{x}^k – wektor rozwiązania w iteracji k -tej,

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{x}^k) \quad (9)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (10)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = -\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -\mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (11)$$

$\mathbf{G}(\mathbf{x})$ nazywana jest macierzą wzmocnienia. Właściwości estymacji stanu systemu elektroenergetycznego można scharakteryzować za pomocą:

- liczby iteracji (L_{it})
- wskaźnika uwarunkowania macierzy wzmocnienia ($\text{cond}(\mathbf{G})$)
- wskaźnika J_e/J_m [10], gdzie:

$$J_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [(z_i - z_i^r)/\sigma_i]^2, \quad J_e = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [(\dot{z}_i - z_i^r)/\sigma_i]^2$$

z_p , \dot{z}_p , z_i^r – wartości, odpowiednio: mierzona, estymowana i rzeczywista i -tej mierzonej wielkości.

Wskaźnik J_e/J_m powinien spełniać warunek:

$$\frac{J_e}{J_m} < 1 \quad (12)$$

Jeśli warunek (12) nie jest spełniony, wówczas dokładność wyników estymacji ocenia się jako niedostateczną. Im mniejsze

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 88–94. When referring to the article please refer to the original text.

PL

wartości mają rozpatrywane wskaźniki, tym lepsze są właściwości procesu estymacji stanu.

Podane wcześniej wskaźniki uwzględniane są w dalszej opisanych badaniach.

Na potrzeby badań przyjmuje się następujący wzór jako wskaźnik uwarunkowania macierzy wzmacnienia:

$$\text{cond}(\mathbf{G}) = \frac{\lambda_M}{\lambda_m} \quad (13)$$

gdzie: λ_m , λ_M – odpowiednio: minimalna i maksymalna wartość własna macierzy \mathbf{G} .

Wskaźnik uwarunkowania macierzy wzmacnienia charakteryzuje wrażliwość na błędy obarczające dane, które wykorzystywane są w procesie estymacji.

3. Symetryczny przesuwnik fazowy

Ogólny schemat zastępczy przesuwника fazowego przedstawia rys. 1 [5, 6]. W schemacie tym wyróżniane są: bocznikowy transformator wzbudzenia (ET), szeregowy transformator dodawczy (BT) wprowadzający szeregowo napięcie (\bar{V}_{BT}) do systemu i przełącznik zaczeów. Przełącznik zaczeów reguluje napięcie \bar{V}_{BT} . W konwencjonalnym przesuwniku fazowym przełącznik zaczeów jest mechaniczny. W nowoczesnym rozwiązaniu mechaniczny przełącznik zaczeów zastępowany jest przełącznikiem półprzewodnikowym.

Symetryczny przesuwnik fazowy jest jednym z typów przesuwника fazowego. Umożliwia on otrzymanie napięcia wyjściowego o takim samym module jak napięcie zasilające, ale przesunięte w fazie względem tego napięcia zasilającego (rys. 2).

W artykule przyjmuje się, że przesuwnik fazowy reprezentuje model pokazany na rys. 3. Model ten składa się z dwóch regulowanych źródeł napięciowych (tak jak w [9]). Ich impedancje wewnętrzne \bar{z}_{ET} oraz \bar{z}_{BT} reprezentują, odpowiednio, impedancje transformatorów ET i BT.

Dla modelu z rys. 3 można wyprowadzić następujące równania:

$$\bar{S}_{ik}^* = -V_i^2 (\bar{y}_{ET} + \bar{y}_{BT}) + \bar{V}_k \bar{V}_i^* \bar{y}_{BT} - \bar{V}_{BT} \bar{V}_i^* \bar{y}_{BT} + \bar{V}_{ET} \bar{V}_i^* \bar{y}_{BT} \quad (14)$$

$$\bar{S}_{ki}^* = -V_k^2 \bar{y}_{BT} + \bar{V}_i \bar{V}_k^* \bar{y}_{BT} + \bar{V}_{BT} \bar{V}_k^* \bar{y}_{BT} \quad (15)$$

$$\bar{S}_{BT}^* = V_{BT}^2 \bar{y}_{BT} + \bar{V}_i \bar{V}_{BT}^* \bar{y}_{BT} - \bar{V}_k \bar{V}_{BT}^* \bar{y}_{BT} \quad (16)$$

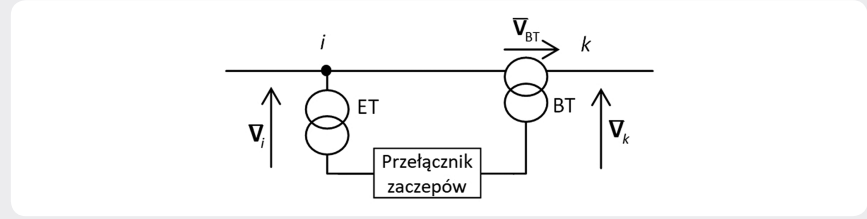
$$\bar{S}_{ET}^* = V_{ET}^2 \bar{y}_{ET} - \bar{V}_i \bar{V}_{ET}^* \bar{y}_{ET} \quad (17)$$

Pomijając straty przesuwника fazowego, można stwierdzić, że przesuwnik fazowy nie pobiera ani nie oddaje mocy pozornej, tzn. moc pozorna dostarczana do transformatora ET równa się mocy pozornej pobieranej przez transformator BT:

$$\bar{S}_{ET} + \bar{S}_{BT} = 0 \quad (18)$$

Moc węzłowe \bar{S}_{i-AC} oraz \bar{S}_{k-AC} , obliczone z (4), modyfikowane są następująco:

$$\bar{S}_i = \bar{S}_{i-AC} - \bar{S}_{ik} \quad (19)$$



Rys. 1. Schemat zastępczy przesuwника fazowego

$$\bar{S}_k = \bar{S}_{k-AC} - \bar{S}_{ki} \quad (20)$$

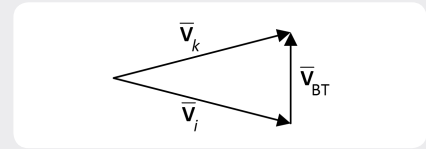
Równania (14–20) dotyczą przesuwника fazowego niezależnie od tego, jaka jest relacja pomiędzy modułami napięcia wyjściowego i zasilającego. Jeżeli przesuwnik fazowy jest symetryczny, to w biegunowym układzie współrzędnych można podać dodatkową zależność:

$$V_i - V_k = 0 \quad (21)$$

4. Przeprowadzone badania

4.1. Założenia

1. Stosowany jest 14-węzłowy system testowy IEEE (rys. 4).
2. Na potrzeby badań 14-węzłowy system testowy IEEE jest modyfikowany. W systemie tym jest symetryczny przesuwnik fazowy połączony szeregowo z linią łączącą węzły 5 i 4 w oryginalnym systemie testowym. Przesuwnik fazowy jest przy węźle 5.
3. Rozważa się 11 wariantów obciążenia. Dla danego wariantu każde obciążenie czynne i bierne oraz moc generowaną określa się jako: $W = 0,5W_b + l \cdot W_b$, gdzie W , W_b – obliczona i bazowa wartość ilości którejś ze wspomnianych wielkości; $l \in \{0, 0, 1, 0, 2, \dots, 1\}$. $V^{0,5+l}$ oznacza wariant skrajny z l .
4. Dla każdego wariantu obciążenia przesunięcie fazowe, wprowadzane przez przesuwnik fazowy, jest w przedziale $[-20^\circ, 20^\circ]$ (tak jak to jest dla polskich przesuwników fazowych).
5. Uwzględnia się cztery poziomy redundancji danych, tj.: r_1 , r_2 , r_3 , oraz r_4 , gdzie $r_1 = 1,1$ (34 pomiary), $r_2 = 1,7$ (53 pomiary), $r_3 = 2,2$ (68 pomiarów), $r_4 = 3,6$ (104 pomiary).
6. Dla każdego poziomu redundancji danych losowo generuje się 100 różnych lokalizacji systemów pomiarowych.
7. Każdy pomiar obciążony jest małym błędem scharakteryzowanym rozkładem Gaussa ze średnią równą 0 i odchyleniem



Rys. 2. Wykres wskazowy dla symetrycznego przesuwника fazowego

standardowym σ , zdefiniowanym jako [12–13]:

$\sigma = 1/3[(0,001 + 0,0025)FS + 0,02M]$ dla mocy czynnej;

$\sigma = 1/3[(0,001 + 0,005)FS + 0,02M]$ dla mocy biernej i

$\sigma = 1/3[(0,0005 + 0,0025)FS + 0,003M]$ dla napięcia, gdzie FS jest zakresem pomiarowym, a M jest wartością zmierzoną.

8. Estymacja stanu jest estymacją najmniejszych ważonych kwadratów.

9. Wektor stanu wyznaczany jest z wykorzystaniem równań normalnych.

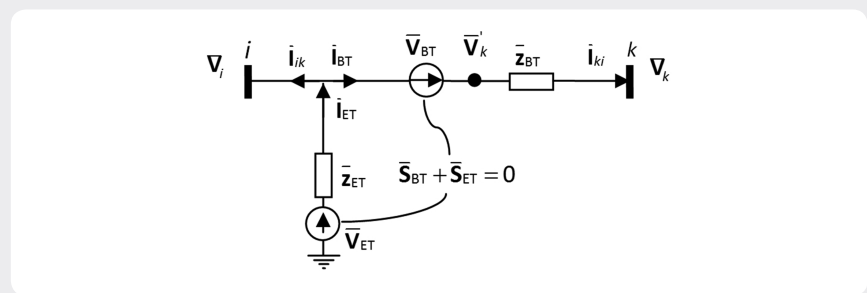
10. Obliczenia estymacji stanu wykonywane są w układzie współrzędnych biegunowych.

11. Uwzględniane są:
1) SE_Ph, tj. estymacja stanu systemu elektroenergetycznego z symetrycznym przesuwnikiem fazowym modelowanym z wykorzystaniem ogólnego modelu przesuwника fazowego przedstawionym na rys. 3

2) SE_SY, tj. estymacja SE_Ph z uwzględnieniem specyficznej informacji o symetrycznym przesuwniku fazowym, zawartej w zależności (21).

4.2. Wyniki

Wyniki badań zawarte są na rys. 5–10 i w tab. 1–6. Na rys. 5–10 przedstawiano wartości rozpatrywanych wskaźników, charakteryzujących estymację stanu, tj.: L_{it} , $\text{cond}(\mathbf{G})$, J_e/J_m . Podano je w kolejności malejącej. Dla dowolnego punktu krzywej na rys. 5–10 rzędna to wartość



Rys. 3. Przyjęty model przetwornicy kwadraturowej

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 88–94. When referring to the article please refer to the original text.

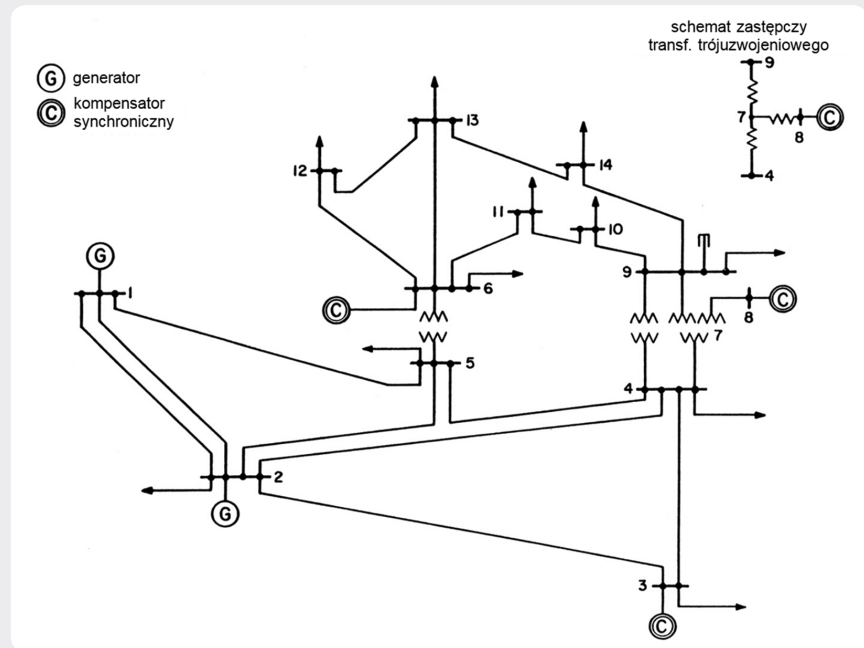
PL

rozpatrywanego wskaźnika – nie większa niż inne wartości określone dla przypadków estymacji stanu, których liczba jest określona przez odciętą (wyrażoną jako procent wszystkich przypadków).

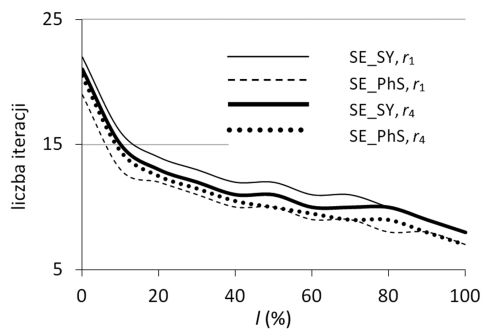
Tabele 1–4 zawierają parametry rozpatrywanych wskaźników (L_{it} , $cond(G)$, J_e/J_m) dla różnych warunków realizacji estymacji stanu: minimum, maksimum, wartość średnia i odchylenie standardowe.

Wyniki na rys. 5, rys. 7, rys. 9 i w tab. 1, tab. 3, tab. 5 uzyskano dla wariantu obciążenia $V^{0.5}$, a na rys. 6, rys. 8, rys. 10 i w tab. 2, tab. 4, tab. 6 – dla wariantu obciążenia $V^{1.5}$.

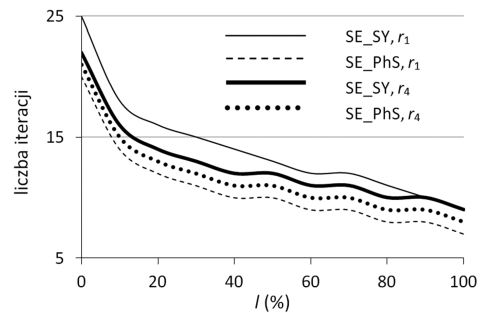
Na rys. 5 i 6 pokazano, że dla SE_SY krzywe przedstawiające wartości L_{it} w funkcji liczby przypadków estymacji stanu są powyżej odpowiednich krzywych dla SE_PhS. Ten fakt oznacza, że jeżeli rozpatrujemy przypadki estymacji stanu, dla których L_{it} jest nie mniejsze od ustalonej wartości, to liczba przypadków obliczeń SE_SY jest większa niż liczba przypadków obliczeń SE_PhS. Inna sytuacja jest dla wskaźników $cond(G)$ i J_e/J_m . Na rys. 7 i 10 pokazano, że dla SE_SY krzywe przedstawiające wartości tych wskaźników w funkcji liczby przypadków estymacji stanu są poniżej odpowiednich krzywych dla SE_PhS. To stwierdzenie oznacza, że obecnie,



Rys. 4. 14-węzłowy system testowy IEEE [11]



Rys. 5. Liczba iteracji w procesie estymacji stanu dla wariantu obciążenia $V^{0.5}$



Rys. 6. Liczba iteracji w procesie estymacji stanu dla wariantu obciążenia $V^{1.5}$

poziom redundancji danych	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min.	7	7	7	7	8	8	8	8
max.	19	20	20	21	22	22	22	21
średnia	10,18	10,77	10,70	10,90	12,19	11,75	11,61	11,46
odchylenie standardowe	2,37	2,47	2,49	2,55	2,636	2,54	2,46	2,35

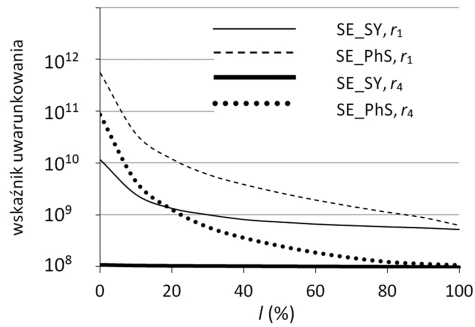
Tab. 1. Parametry wskaźnika L_{it} dla wariantu obciążenia $V^{0.5}$

poziom redundancji danych	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min.	7	7	7	7	9	9	9	8
max.	20	20	21	21	25	24	23	22
średnia	10,19	10,96	10,87	11,36	13,54	12,76	12,71	12,46
odchylenie standardowe	2,48	2,54	2,49	2,58	3,03	2,73	2,69	2,53

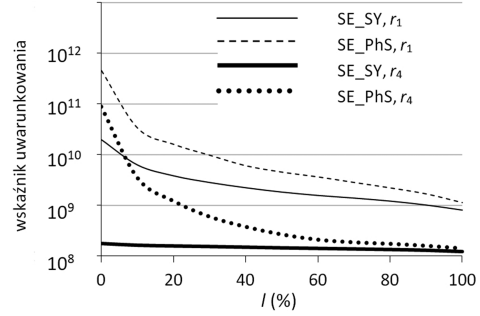
Tab. 2. Parametry wskaźnika L_{it} dla wariantu obciążenia $V^{1.5}$

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 88–94. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 7. Wskaźnik uwarunkowania procesu estymacji stanu dla wariantu obciążenia $V^{0.5}$



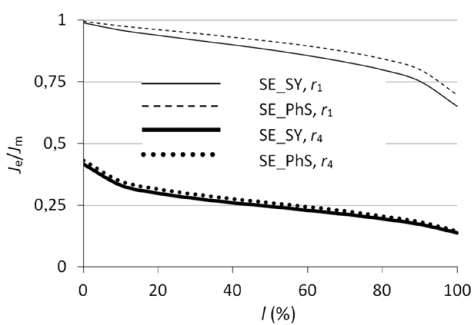
Rys. 8. Wskaźnik uwarunkowania procesu estymacji stanu dla wariantu obciążenia $V^{1.5}$

poziom redundancji danych	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min.	5,9E+08	2,2E+08	1,5E+08	1,0E+08	5,1E+08	2,0E+08	1,2E+08	9,7E+07
max.	5,5E+11	2,2E+11	1,7E+11	8,6E+10	1,2E+10	1,1E+09	2,8E+08	1,1E+08
średnia	1,8E+10	6,0E+09	5,1E+09	2,7E+09	1,2E+09	2,6E+08	1,4E+08	1,0E+08
odchylenie standardowe	5,6E+10	2,1E+10	1,9E+10	1,1E+10	1,4E+09	1,1E+08	1,8E+07	1,9E+06

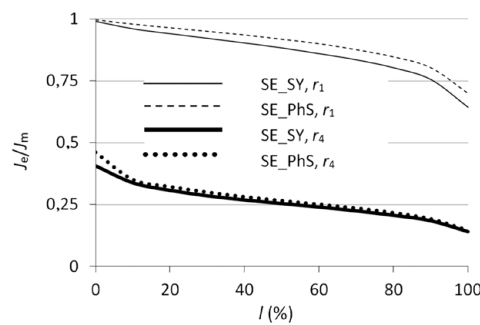
Tab. 3. Parametry wskaźnika cond(G) dla wariantu obciążenia $V^{0.5}$

poziom redundancji danych	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min.	1,0E+09	3,5E+08	2,3E+08	1,4E+08	7,8E+08	2,8E+08	1,8E+08	1,2E+08
max.	4,6E+11	2,2E+11	1,6E+11	8,8E+10	2,0E+10	2,6E+09	7,4E+08	1,8E+08
średnia	1,7E+10	6,4E+09	4,5E+09	2,6E+09	3,0E+09	5,8E+08	2,8E+08	1,5E+08
odchylenie standardowe	4,2E+10	2,0E+10	1,6E+10	9,9E+09	3,3E+09	3,6E+08	8,2E+07	1,2E+07

Tab. 4. Parametry wskaźnika cond(G) dla wariantu obciążenia $V^{1.5}$



Rys. 9. Wskaźnik J_e/J_m w procesie estymacji stanu dla wariantu obciążenia $V^{0.5}$



Rys. 10. Wskaźnik J_e/J_m w procesie estymacji stanu dla wariantu obciążenia $V^{1.5}$

poziom redundancji danych	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min.	0,66	0,32	0,22	0,13	0,61	0,30	0,21	0,13
max.	1,00	0,77	0,62	0,43	0,99	0,74	0,60	0,42
średnia	0,90	0,54	0,41	0,26	0,87	0,52	0,39	0,25
odchylenie standardowe	0,07	0,09	0,08	0,06	0,08	0,09	0,08	0,06

Tab. 5. Parametry wskaźnika J_e/J_m dla wariantu obciążenia $V^{0.5}$

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 88–94. When referring to the article please refer to the original text.

PL

poziom redundancji danych	SE_PhS				SE_SY			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
min.	0,66	0,31	0,23	0,13	0,61	0,29	0,22	0,13
max.	1,00	0,77	0,63	0,46	0,99	0,74	0,61	0,41
średnia	0,90	0,55	0,42	0,27	0,87	0,53	0,41	0,26
odchylenie standardowe	0,07	0,09	0,08	0,06	0,08	0,09	0,08	0,06

Tab. 6. Parametry wskaźnika J_e/J_m dla wariantu obciążenia $V^{1,5}$

jeżeli rozpatrujemy przypadki estymacji stanu, dla których $\text{cond}(G)$ albo J_e/J_m jest nie mniejsze od ustalonej wartości, to liczba przypadków obliczeń SE_SY jest mniejsza niż liczba przypadków obliczeń SE_PhS.

Można stwierdzić, że wskaźnik L_{it} przyjmuje wartości bardziej korzystne dla SE_PhS niż dla SE_SY, a wskaźniki $\text{cond}(G)$, J_e/J_m bardziej korzystne dla SE_SY niż dla SE_PhS. Ten wniosek jakościowy potwierdza analiza wartości podanych w tab. 1–6.

Analizy danych z tab. 1 i 2 pokazują, że dla SE_SY prawie wszystkie parametry L_{it} są nie mniejsze niż dla SE_PhS. Wyjątkami są odchylenia standardowe dla:

- 1) nadmiaru danych r_3 i wariantu obciążenia $V^{0,5}$
- 2) nadmiaru danych r_4 i wariantu obciążenia $V^{0,5}$ i $V^{1,5}$.

W tab. 3 i 4 pokazano, że wszystkie parametry wskaźnika $\text{cond}(G)$ są mniejsze dla SE_SY niż dla SE_PhS. Analizując tab. 5 i 6, można natomiast stwierdzić, że tylko odchylenia standardowe J_e/J_m dla nadmiaru danych r_1 i wariantu obciążenia $V^{0,5}$ i $V^{1,5}$ są większe dla SE_SY niż dla SE_PhS.

Porównując parametry dla SE_SY i SE_PhS, można zauważyć, że największe różnice występują dla $\text{cond}(G)$. W wartościach średnich te różnice wynoszą od -96,24% do -93,42% dla wariantu obciążenia $V^{0,5}$ i od -94,37% do -82,02% dla wariantu obciążenia $V^{1,5}$. Mniejsze różnice parametrów są dla L_{it} . W wartościach średnich wynoszą one od 5,23% do 19,85% dla wariantu obciążenia $V^{0,5}$ i od 9,68% do 32,84% dla wariantu obciążenia $V^{1,5}$. Najmniejsze różnice parametrów są dla wskaźnika J_e/J_m . W wartościach średnich wynoszą one od -4,96% do -3,77% dla wariantu obciążenia $V^{0,5}$ i od -4,60% do -3,80% dla wariantu obciążenia $V^{1,5}$.

Wcześniej przedstawione wartości względne wartości średnich obliczane są według następującego wzoru:

$$\rho_{r\%} = 100 \frac{p_{SY} - p_{PhS}}{p_{PhS}} \quad (22)$$

gdzie: p_{SY} , p_{PhS} – wartości parametru p (tj. wartości średniej) rozpatrywanego wskaźnika dla odpowiednio: SE_SY i SE_PhS.

5. Wnioski

W czasie estymacji stanu systemu elektroenergetycznego z przesuwnikiem fazowym można uwzględnić jego specyficzne właściwości albo można ich nie uwzględniać. W tym artykule proces estymacji w pierwszym przypadku oznaczany jest przez SE_SY,

a w drugim przez SE_PhS. Rozważane jest jedno z rozwiązań przesuwnika fazowego, jakim jest symetryczny przesuwnik fazowy. Przeprowadzone badania dowiodły, że dla takich wskaźników charakteryzujących estymację stanu systemu elektroenergetycznego jak wskaźnik uwarunkowania macierzy wzmocnienia $\text{cond}(G)$ oraz wskaźnik J_e/J_m uwzględnienie specyficznych właściwości przesuwnika fazowego (tj. symetrycznego przesuwnika fazowego) umożliwia poprawę właściwości obliczeń estymacji stanu w układzie współrzędnych biegunowych. Ogólnie rzecz biorąc, wartości minimalna, maksymalna i średnia oraz odchylenie standardowe wskaźnika uwarunkowania $\text{cond}(G)$ oraz wskaźnika J_e/J_m są bardziej korzystne dla SE_SY niż dla SE_PhS. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że w każdym przypadku wspomniane wskaźniki są mniejsze dla SE_SY. Biorąc pod uwagę liczbę iteracji L_{it} , można zauważyć, że sytuacja jest inna. Wartości L_{it} są większe dla SE_SY niż dla SE_PhS.

Analizując parametry branych pod uwagę wskaźników (L_{it} , $\text{cond}(G)$ i J_e/J_m), szczególnie duża różnica może być zaobserwowana pomiędzy wartościami średnimi wskaźnika $\text{cond}(G)$ dla SE_SY i SE_PhS. Zauważalnie różnią się wartości średnie liczby iteracji L_{it} przy różnym uwzględnieniu specyficznych właściwości przesuwnika fazowego, ale w tym przypadku SE_SY jest mniej korzystne niż SE_PhS. Stosunkowo niewielka różnica jest pomiędzy wartościami średnimi wskaźnika J_e/J_m obliczanymi dla SE_SY i SE_PhS.

Ostatecznie można stwierdzić, że przeprowadzone badania dają podstawę do stwierdzenia, że uwzględnienie specyficznych właściwości przesuwnika fazowego zmniejsza wrażliwość na błędy obciążające dane pomiarowe i zwiększa dokładność wyników, ale zwiększa liczbę iteracji w procesie estymacji stanu systemu elektroenergetycznego w układzie współrzędnych biegunowych.

Bibliografia

1. Scheppe C., Wildes J., Power System Static-State Estimation [Ocena stanu statycznego systemu el. en.], Part I–III, *IEEE Trans. PAS* 1970, Vol. 89, No. 1, s. 120–135.
2. Arrillaga J., Duke R.M., Thyristor-controlled quadrature boosting [Sterowany tyrystorowo wzmacniacz kwadraturowy], *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 1979, Vol. 126, No. 6, s. 493–498.
3. Zhu M., Dale L.A., Application and modelling of quadrature boosters for the HV transmission system [Zastosowanie i modelowanie wzmacniaczy kwadraturowych dla systemu przesyłowego WN], *Proc. Int. Conf. Power System Technology (POWERCON)*, Aug. 1998, s. 923–927.
4. Gabrijel A., Mihalic B., Phase-shifting transformers in a structure-preserving energy function [Przesuwniki fazowe jako struktury oszczędzania energii], *Electric Power Systems Research* 2005, Vol. 74, No. 2, s. 323–330.
5. Irvani M.R., Maratukulam D., Review of semiconductor-controlled (static) phase shifters for power systems applications [Przegląd sterowanych półprzewodnikowo (statycznych) przesuwników fazowych do zastosowań w systemach elektroenergetycznych], *IEEE Transactions on Power Systems* 1994, Vol. 9, No. 4, s. 1833–1839.
6. Okoń T., Wilkosz K., Phase shifter models for steady state analysis [Modele przesuwników fazowych do analizy stanu ustalonego], *Proc. 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2016, s. 1–6.
7. Verboomen J. i in., Phase shifting transformers: principles and applications [Przesuwniki fazowe: zasady i zastosowania], *Proc. 2005 International Conference on Future Power Systems*, 2005, s. 1–6.
8. Okoń T., Wilkosz K., Comparison of weighted-least-squares power system state estimation in polar and rectangular coordinate systems [Porównanie estymacji stanu systemu elektroenergetycznego o najmniejszych wartościach kwadratowych w układach współrzędnych biegunowych i prostokątnych], *Proc. 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2010, s. 140–143.
9. Okoń T., Wilkosz K., WLS state estimation in polar and rectangular coordinate systems for power system with UPFC: Significance of types of measurements [Estymacja stanu WLS w układzie współrzędnych biegunowych i prostokątnych dla systemu elektroenergetycznego z UPFC: Znaczenie i rodzaje pomiarów], *Proc. Modern Electric Power Systems (MEPS)*, 2010, s. 1–6.
10. Acha E., FACTS: Modelling and simulation in power networks [FAKTY: Modelowanie i symulacja w sieciach energetycznych], Chichester Wiley, 2004.
11. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 88–94. When referring to the article please refer to the original text.

PL

12. Dopazo J. i in., State Calculation of Power Systems From Line Flow Measurements [Obliczanie stanów systemów el. en. na podstawie pomiarów przepływu liniowego], *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1970, Vol. PAS-89, No. 7, s. 1698–1708.
13. Dopazo J., Klitin O., Van Slyck L., State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements [Obliczanie stanów systemów el. en. na podstawie pomiarów przepływu liniowego], Part II, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1972, Vol. PAS-91, No. 1, s. 145–151.

Kazimierz Wilkosz

prof. dr hab. Inż.

Politechnika Wroclawska

email: Kazimierz.Wilkosz@pwr.edu.pl

W działalności naukowej związany z Politechniką Wrocławską. Członek SEP, CIGRE, IEEE, Komitetu Elektrotechniki PAN. Zasiada w komitetach naukowych wielu konferencji krajowych oraz zagranicznych. Realizował wiele projektów badawczych, w tym finansowanych przez partnerów przemysłowych krajowych (np. PSE, Tauron, EnergiaPro, KGHM) i zagranicznych (EPRI). Jego zainteresowania naukowe oraz działalność dydaktyczna koncentrują się w zakresie modelowania i analiz systemu elektroenergetycznego oraz zastosowań informatyki w elektroenergetyce.

Tomasz Okoń

dr inż.

Politechnika Wroclawska

email: Tomasz.Okon@pwr.edu.pl

Aktywność naukową związał z Wydziałem Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej, gdzie otrzymał tytuł magistra inżyniera oraz stopień doktora nauk technicznych. Jest członkiem IEEE. Brał udział w realizacji wielu projektów badawczych dotyczących systemu elektroenergetycznego. Jego zainteresowania naukowe umiejscowione są w obszarze modelowania i analiz systemu elektroenergetycznego.