Modeling of a 3-Phase Induction Generator Including Magnetic Cross Saturation Effect

Authors

Mohd Sartaj Mohd Rizwan Khan Mohd Faisal Khan

Keywords

self-excited induction generator, Cross-saturation effect, Resistive load, dq modelling

Abstract

In current energy scenario the contribution of renewable energy is increasing at substantial rate to achieve pollution free energy generation on long term basis. To reach this goal various researches are going on all over the world in the field of solar, wind and other renewable method of power generation. With the advantages of robustness and self-excitation, squirrel cage type induction machines are used for wind energy conversion system (WECS) and for small hydro power plants as self-excited induction generator (SEIG). To harness renewable and clean energy from wind or small hydro plants, it is required to understand SEIG transient behaviour in better way for smooth control of output voltage and frequency. In this paper non-linear dynamic model of 3-phase induction generator is presented along with its no-load and on-load performance analysis.

DOI: 10.12736/issn.2330-3022.2020104

Received: 30.09.2019 Revised: 14.11.2019 Accepted: 14.11.2019 Published online: 27.07.2020

Introduction

Industrialization is going on all over the world in developed as well as developing countries. Every economy is increasing the per capita energy consumption of its citizens. From last two centuries, fossil fuels are the main supplement for energy production either for household or for industry applications. Fossil fuels have two problems associated with them, one of them is that they are going to exhaust, and other one is of pollution, associated with them. This is the need of the time for every excessive greenhouse releasing country, to have maximum dependence on renewable and pollution free generation of electric energy.

Induction generators are the choice when we talk about electric energy generation by wind, because of the several advantages over other counterparts like low unit cost, reduced maintenance, rugged and brushless construction (squirrel caged type rotor induction generator). Absence of d.c. source for excitation, absence of moving electric contacts (SEIG), inherent over-load protection, improved performance due to low transient impedance, natural protection against short circuit, are advantages that make the machine can be used in remote, unattended and maintenance free sites [1, 12]. In this paper non-linear dynamic model of 3-phase induction generator is discussed, that consider the cross saturation effects. Complete model of 3-phase asynchronous machine was discussed by many authors [3–11]. Comparison of the full model and the simplified model of three phase induction machine was carried out in literature. The full model has a dynamic cross-saturation component of inductance. The simplified model does not go with generally accepted principles of machines modelling.

The aim of this paper is to analyse variation of different parameters of 3-phase induction generator for model accounting for dynamic cross-saturation effects. Here current is taken as state variable. This model will be referred to as the full model. Thus, the models only differ in the dynamic cross-saturation terms which are zero in steady-state condition. By application of load at 2 second transient in generated voltage, supplied current, magnetizing current, magnetizing inductance are reported.

The paper is divided into four sections. Section one is introduction which gives brief introduction about squirrel cage type induction generator and basic detail about models of induction generator (simplified and full model). Section two covers the mathematical modelling of basic 3-phase induction generator



and mathematical modelling for cross-saturation effect. Section three presents simulation results and section four summarises discussion about the asynchronous generator mathematical modelling.

Mathematical modelling

Voltage equations in machine variables

The voltage equations in machine variables may be expressed as in [13].

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \tag{1}$$

$$v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \tag{2}$$

In the above equations v and i represents the 3x1 voltage and current matrices respectively, λ represents 3x3 flux linkage matrix. Subscript s denotes variables and parameters associated with the stator circuits. Subscript r denotes variables and parameters associated with the rotor circuits. The r_s and r_r are the 3x3 stator and rotor resistance matrices each with equal non-zero elements. And p is differentiation operator.

For a magnetically linear system, the flux linkages may be expressed as

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix}$$
(3)

The voltage equations expressed in terms of machine variables referred to the stator windings may now be written as

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abcs} \\ \mathbf{v}'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ p\left(L'_{sr}\right)^T & r'_r + pL_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix}$$
(4)

where L denotes appropriate self and mutual inductances

Torque equation in machine variables

The energy stored in coupling field may be written as

$$W_{f} = \frac{1}{2} (i_{abcs})^{T} L_{s} i_{abcs} + \frac{1}{2} (i'_{abcr})^{T} L_{r} i'_{abcr} + (i_{abcs})^{T} L'_{sr} i'_{abcr}$$
(5)

While the torque in expanded form can be written as [13]

$$T_{e} = -\frac{P}{2}L_{ms}\left\{\left(i_{as}i_{ar} + i_{bs}i_{br} + i_{cs}i_{cr}\right)sin\vartheta + \left(i_{as}i_{br} + i_{bs}i_{cr} + i_{cs}i_{ar}\right)sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3})\right\}$$
$$+\left(i_{as}i_{cr} + i_{bs}i_{ar} + i_{cs}i_{br}\right)sin(\vartheta + \frac{2\pi}{3})$$
(6)

where ϑ is angle between axes related to stator and rotor, and *P* is a number of poles.

Dq modelling of 3-phase machine

The machine equations and parameters are usually transformed from the machine variables form to *dq* form with the help of Park's transformation. By applying Park's transformation to stator and rotor voltages, currents, fluxes, inductances and resistances, the simplified equations of three phase induction machine takes a form

Stator voltage

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} + p \psi_{ds}$$

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} + p \psi_{qs}$$

$$v_{0s} = -r_s i_{0s} + p \psi_{0s}$$
(7)

Rotor voltage

 $\langle - \rangle$

$$\begin{aligned} v_{dr} &= r_r' i_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + p \psi_{dr} \\ v_{qr} &= r_r' i_{qr} + \omega_r \psi_{dr} + p \psi_{qr} \\ v_{or} &= r_r' i_{or} + p \psi_{or} \end{aligned}$$
 (8)

where ω_r is the rotor speed and ψ are appropriate fluxes. As this is a squirrel caged type machine, the rotor voltages are equal to 0. Then the modified rotor equations take a form

$$O = r_r' i_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + p \psi_{dr}$$

$$O = r_r' i_{qr} + \omega_r \psi_{dr} + p \psi_{qr}$$

$$O = r_r' i_{xy0r} + p \psi_{xy0r}$$
(9)

Torque equation in dq0 reference frame

For balanced load system the torque equation is composed from *dq* component only, i.e. the zero sequence component does not contribute to torque.

$$T_e = 3\left(\frac{P}{2}\right) L_m(i_{ds}i_{qr} - i_{qs}i_{dr})$$

$$T_e = PL_m(i_{ds}i_{qr} - i_{qs}i_{dr})$$
(10)

Analysis for full model including cross-saturation

For considering the cross-saturation effect it is necessary to look to the basic magnetic circuit of induction machine comprising stator and rotor. The direct axis component of mutual flux give rise to d axis component voltage given by the following equation.

$$v_{md} = \frac{d\psi_{md}}{dt} = \frac{d(L_m i_{md})}{dt}$$
(11)

Equation (11) can be expanded by partial differentiation

$$\frac{d(L_m i_{md})}{dt} = i_{md} \frac{dL_m}{dt} + Lm \frac{di_{md}}{dt}$$
(12)

To simplify the above expression the time derivative of magnetizing inductance can be written as

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt}$$
(13)

The magnitude of magnetising component of the current is are recorded to plot the curve of L_m . Whereas L can be obtained the sum of direct axis and quadrature axis current given by $|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{ma}^2}$.

The time derivative of magnetizing current can be, using partial differentiation, written as

$$\frac{d\left|i_{m}\right|}{dt} = \left(i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt}\right) / |i_{m}|$$
(14)

By putting Eq. (14) in Eq. (13), we get

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{1}{|i_m|} (i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt})$$
(15)

Above expression can be substitute in Eq. (12)

$$v_{md} = i_{md} \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{1}{|i_m|} (i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt}) + L_m \frac{di_{md}}{dt}$$
(16)

After rearranging the Eq. (16) we have

$$\mathbf{v}_{md} = \left(\frac{i_{md}}{i_{mq}}\frac{i_{mq}i_{md}}{|i_m|}\frac{dL_m}{d|i_m|} + L_m\right)\frac{di_{md}}{dti} + \left(\frac{i_{md}i_{mq}}{d|i_m|}\frac{dL_m}{dt_m|}\right)\frac{di_{mq}}{dt_m}$$
(17)

$$\mathbf{V}_{md} = \left(\frac{i_{md}}{i_{mq}}L_{dq} + L_m\right)\frac{di_{md}}{dt} + \left(L_{dq}\right)\frac{di_{mq}}{dt} \tag{18}$$

$$\mathbf{v}_{md} = \left(L_{mD}\right) \frac{di_{md}}{dt} + \left(L_{dq}\right) \frac{di_{mq}}{dt} \tag{1}$$

Similarly for q axis

$$v_{mq} = \left(L_{mQ}\right) \frac{di_{mq}}{dt} + \left(L_{dq}\right) \frac{di_{md}}{dt}$$
(20)

Where,

$$L_{mD} = \frac{i_{md}}{i_{mq}} L_{dq} + L_m \text{ and } L_{mQ} = \frac{i_{mq}}{i_{md}} L_{dq} + L_m$$

The only term which is responsible for cross saturation effect is L_{da} (cross saturated inductance). If the value of this term L_{da} is zero then the all equation of saturated model will look like to simplified model $L_{mD} = L_{mQ}$, $L_{sD} = L_{sQ}$, $L_{rd} = L_{rq'}$ and $L_r = L_{lr} + L_m$. The value of term L_{da} can be found out with help of magnetizing inductance L_m and dynamic inductance L. Magnetizing inductance L_m and dynamic inductance L are static non-linear function of magnetizing current given by $L_m = f_1(i_m)$ and $L = f_2(i_m)$. The function $L_m = f_1(i_m)$ can be obtained by synchronous speed test. By giving different supply voltage to the stator of induction machine and by running the rotor of the machine at synchronous speed with help of d.c. machine or any constant fixed speed drive [5]. At different voltage different power and current values from $L_m = f_1(i_m)$ using $L = f_2(i_m)$.

ActaEnergetica

$$L_{dq} = \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} \frac{dL_m}{d|i_m|}$$
(21)

$$L = \frac{d\psi_m}{di_m} = \frac{d(L_m i_m)}{di_m} = i_m \frac{dL_m}{di_m} + L_m$$
(22)

5)
$$i_m \frac{dL_m}{di_m} = L - L_m$$
(23)

The magnetizing and dynamic inductance characteristics with respect to current are shown in Fig. 1, as a function of current .The machine parameters which are given in [2] are for three phase 1.5 kW slip-ring induction machine. [2]

The full model of 3-phase induction generator incorporating cross saturation effect is defined by Eqs. (24)-(29). The simplified model can be obtained her by grounding the effect of cross-saturating inductance L_{da} .

$$v_{ds} = r_{s}i_{ds} + L_{sD}pi_{ds} + L_{dq}pi_{qs} + L_{mD}pi_{dr} + L_{dq}pi_{qr}$$
(24)

)
$$V_{qs} = r_s i_{qs} + L_{dq} p i_{ds} + L_{sQ} p i_{qs} + L_{dq} p i_{dr} + L_{mQ} p i_{qr}$$
 (25)

$$v_{os} = r_{s}i_{os} + L_{ls}pi_{os}$$
(26)

9)
$$0 = r_r i_{dr} + \omega_r (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) + L_{mD} p i_{ds} + L_{dq} p i_{qs} + L_{rd} p i_{dr} + L_{dq} p i_{qr}$$
(27)

$$D = r_r i_{qr} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) + L_{dq} p i_{ds} + L_{mQ} p i_{qs} + L_{dq} p i_{dr} + L_{rq} p i_{qr}$$
(28)

$$O = r_r i_{Or} + L_{Ir} p i_{Or}$$
⁽²⁹⁾

Figures presented below show the model of three-phase induction generator response to various states/processes.



Fig. 1. Variation of the saturated magnetizing inductance (L_m) , the dynamic inductance (L) and $|i_m| dL_m / d|i_m|$

Figures 2 and 3 show the self-excitation process of no loaded 3-phase SEIG for full model with incorporated cross-saturation effect. The shunt capacitors connected to the stator was equal to 36 μ F. The capacitors were chosen to allow to achieve rated terminal voltage at no-load when the generator is driven at rated speed. From Fig. 4, it can be seen that generated 3-phase voltages are sinusoidal and free from any distortions.

Figures 4 and 5 show the behaviour of terminal voltage on application of 3-phase resistive load of 32 Ω at time t = 2 s. It can be seen that terminal voltage dips on application of the load although before t = 2 s voltage build up process has already been completed.











Fig. Fig. 6. Load current of 3-phase SEIG

The asynchronous generators operating with shunt capacitors does not allow to control the terminal voltage. The voltage depends on load. To overcome the problem of poor (lack of) voltage control of SEIG, many power electronic controller and series and shunt capacitance connection schemes are considered [1, 14].

Figures 6 and 7 depict the load current. It is clearly visible from the Figures that before application of load the current is zero, and with a short transient span current rises to rated value.

And finally Fig. 8 shows the variation of inductances and magnetizing current i_m with time. The curves are related to the SEIG



Fig. 3. Zoomed view of generated 3-phase voltages on no-load







Fig. 7. Expanded view of load current after application of load



Fig. 8. Dynamic inductance L, cross magnetizing component $L_{dq'}$ magnetizing inductance L_m and magnetizing current i_m

self-excitation process with resistive load switching on at t = 2 s. The characteristics are more close to experimental behaviour as compared to simplified model in the literature [2, 6, 7].

Conclusion

This paper presents mathematical modelling of 3-phase selfexcited induction generator (SEIG) incorporating dynamic cross-saturation inductance effect. Different output parameters for the studied 3-phase SEIG are reported in the paper for an elaborate analysis. Full and simplified models give similar results for steady state operation but difference is quite visible during transient change. Variable 3-phase output can be converted to controlled 3-phase for grid/3-phase loads with the help of ac-dc--ac converters. Direct output of SEIG can be fed to grid if integrated through relevant controllers, and if input is varying then it can supply those load which do not require constant frequency load.

Acknowledgement

The authors would like to thank CSIR, New Delhi for providing financial support under Direct CSIR-SRF category (09/112(0610)2K19 EMR-1).

REFERENCES

- Khan M.F., Khan M.R., Voltage control of single-phase two winding self-excited induction generator for isolated loads, Int. Conf. Adv. Energy Convers. Technol., pp. 209–214, 2014.
- 2. Khan M.F., Khan M.R., Analysis of voltage build-up and speed disturbance ride through capability of a self-excited induction generator for renewable energy application, *Int. J. Power Energy Convers.*, Vol. 7, No. 2, 2016, p. 157.
- 3. Bodson M., Kiselychnyk O., Analysis of triggered self-excitation in induction generators and experimental validation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 2, 2012, pp. 238–249.

- Khan M.F., Khan M.R., Analysis of a six-phase self-excited induction generator supplying RL load with short shunt connection, IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2016, Vol. 2016-Janua, pp. 1–5, 2017.
- Hallenius K.E., Vas P., Brown J.E., The analysis of a saturated self-excited asynchronous generator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 2, 1991, pp. 336–345.
- Kiselychnyk O., Bodson M., Wang J., Comparison of Two Magnetic Saturation Models of Induction Machines and Experimental Validation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 1, 2017, pp. 81–90.
- Levi E., Impact of cross saturation on accuracy of saturated induction machine models, *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 17, No. 2, 1997, p. 32.
- Almarshoud A.F., Abdel-halim M.A., Alolah A.I., Including Effects Of Cross-Saturation And Leakage Path Saturation Together In The Generalized Model Of Three Phase Induction Machine, Can. Conf. Electr. Comput. Eng., pp. 195–200, 2001.
- 9. Wang L., Jatskevich J., Including magnetic saturation in voltage-behind-reactance induction machine model for EMTP-type solution, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 2, 2010, pp. 975–987.
- Graus J., Hahn I., A new method for the estimation of the influence of stator saturation on the differential inductances, Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013, 2013, pp. 952–959.
- Che H.S. et al., Experimental magnetizing inductance identification in five-phase induction machines, IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2013, pp. 5179–5184.
- Khan M.F., Khan M.R., Iqbal A., Performance analysis of shunt, short shunt and long shunt self-excited induction generator: Analysis of shunt, short shunt and long shunt SEIG, PEDES 2012 – IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst., 2012.
- 13. Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S., Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 2002.



Mohd Sartaj

Department of Electrical Engineering, Aligarh Muslim University, Aligarh, India

e-mail: msartaj@myamu.ac.in

Mohd Sartaj received the B.E. and M.Tech. Degrees in electrical Engineering from the Aligarh Muslim University (AMU), Aligarh, India (2013, 2016). Currently he is pursuing Ph.D. in Multi-phase machines drive technology.

Mohd Rizwan Khan

Department of Electrical Engineering, Aligarh Muslim University, Aligarh, India

e-mail: mrkhan.ee@amu.ac.in

Mohd Rizwan Khan received the B.Tech. and M.Tech. Degrees in electrical, and the Ph.D. degrees from the Aligarh Muslim University (AMU), Aligarh, India (1998, 2001, 2008). He did his Ph.D. in Multiphase Drives. He is currently a Professor in the Department of Electrical Engineering, AMU. His research interests include power electronics, artificial intelligence, and multiphase motor drives.

Has published more than 120 papers in international and national conference and journals including three IEEE transactions.

Mohd Faisal Khan

Electrical Engineering Section, University Polytechnic, Aligarh Muslim University, Aligarh, India

e-mail: mfaisal_khan@yahoo.com

Dr. Mohd. Faisal Khan received B. Tech degree in Electrical Engineering from Jamia Millia Islamia University, New Delhi, India (1999) and the M. Tech and Ph.D. degrees from Aligarh Muslim University, Aligarh, India (2004, 2015). Currently he is Assistant Professor of Electrical Engineering at Aligarh Muslim University and has more than 15 years of teaching and research experience. His research areas of interest include Electrical Machines, Standalone/Grid connected WECS, Multi-Phase Electrical Machines and Drives, Matlab/Simulink based analysis of Electrical Machines. He has about 30 research publications to his credit and is a member of various professional organizations such as IETI, IACSIT and IAENG.



-(PL)

Modelowanie 3-fazowego generatora indukcyjnego z uwzględnieniem efektu skrośnego nasycenia magnetycznego

Autorzy

Mohd Sartaj Mohd Rizwan Khan Mohd Faisal Khan

Słowa kluczowe

samowzbudny generator indukcyjny, efekt nasycenia skrośnego, obciążenie rezystancyjne, modelowanie dą

Streszczenie

W obecnym scenariuszu rozwoju energetyki udział energii odnawialnej rośnie w szybkim tempie, w długoterminowej perspektywie umożliwi to do wytwarzanie energii wolnej od zanieczyszczeń. Aby osiągnąć ten cel, na całym świecie trwają różne badania w dziedzinie energii słonecznej, wiatrowej i innych odnawialnych metod wytwarzania energii. Dzięki zaletom, takim jak: trwałość, niezawodność oraz zdolność do samowzbudzenia, indukcyjne maszyny klatkowe stosuje się w systemach konwersji energii wiatru (WECS) oraz w małych elektrowniach wodnych jako samowzbudne generatory indukcyjne (SEIG). Aby wykorzystać odnawialną i czystą energię z elektrowni wiatrowych lub małych elektrowni wodnych, konieczne jest lepsze zrozumienie zachowań generatorów SEIG w stanach przejściowych, w celu płynnej regulacji napięcia wyjściowego i częstotliwości. W artykule przedstawiono nieliniowy model dynamiczny 3-fazowego generatora indukcyjnego wraz z analizą jego wydajności bez obciążenia i z obciążeniem.

Data wpływu do redakcji: 30.09.2019 Data wpływu do redakcji po recenzjach: 14.11.2019 Data akceptacji artykułu: 14.11.2019 Data publikacji online: 27.07.2020

Wprowadzenie

Uprzemysłowienie postępuje na całym świecie, zarówno w krajach rozwiniętych, jak i rozwijających się. We wszystkich gospodarkach rośnie zużycie energii na jednego mieszkańca. Od dwóch stuleci paliwa kopalne są głównym surowcem do produkcji energii zarówno dla gospodarstw domowych, jak i zastosowań przemysłowych. Paliwa kopalne wiążą się z dwoma problemami, jednym z nich jest ograniczony ich zasób, a drugim związane z nimi zanieczyszczenia. Dzisiejsza rzeczywistość wymaga, aby każdy kraj, w którym nadmiernie emituje się gazy cieplarniane, w jak największym stopniu polegał na odnawialnej i wolnej od zanieczyszczeń produkcji energii elektrycznej.

Jeśli chodzi o wytwarzanie energii elektrycznej z wiatru, to właściwym wyborem są generatory indukcyjne – ze względu na liczne zalety w stosunku do innych odpowiedników, takie jak niski koszt jednostkowy, mniejsze potrzeby konserwacyjne, wytrzymała i bezszczotkowa konstrukcja (generator indukcyjny z wirnikiem klatkowym).

Brak źródła prądu stałego do wzbudzenia, brak ruchomych styków elektrycznych (SEIG), integralne zabezpieczenie przed przeciążeniem, lepsza wydajność dzięki niskiej impedancji przejściowej, naturalne zabezpieczenie przeciwzwarciowe to atuty, które sprawiają, że maszyn tych można używać w odległych, bezobsługowych i niewymagających konserwacji lokalizacjach [1, 12]. W artykule omówiono nieliniowy model dynamiczny 3-fazowego generatora indukcyjnego, uwzględniający efekty nasycenia skrośnego. Kompletny model 3-fazowej maszyny asynchronicznej omówiło wielu autorów [3-11]. W literaturze porównano ten pełen model z modelem uproszczonym 3-fazowej maszyny indukcyjnej. W pełnym modelu indukcyjność zawiera składową dynamicznego nasycenia skrośnego. W modelu uproszczonym pomija się tę składową.

Niniejszy artykuł prezentuje analizę zmienności różnych parametrów 3-fazowego generatora indukcyjnego w celu modelowania uwzględniającego efekty dynamicznego nasycenia skrośnego. Jako zmienną stanu przyjęto prąd. Model ten będzie nazywany modelem pełnym. Modele pełne i uproszczone różnią się wyłącznie uwzględnianiem lub nieuwzględnianiem dynamicznego nasycenia skrośnego, które jest zerowe w stanie ustalonym.

We wprowadzeniu w skrócie przedstawiono generator indukcyjny typu klatkowego i podstawowe informacje na temat modeli generatora indukcyjnego (model uproszczony i pełny). Pierwszy rozdział dotyczy modelowania matematycznego podstawowego, 3-fazowego generatora indukcyjnego i modelowania matematycznego z uwzględnieniem efektu nasycenia skrośnego. Następnie przedstawiono wyniki symulacji, a na koniec podsumowano omówienie matematycznego modelowania generatora asynchronicznego.

Modelowanie matematyczne

Równania napięcia w zmiennych maszynowych

Równania napięcia w zmiennych maszynowych (naturalnych) można wyrazić tak jak w [13], tj.

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs}$$

$$v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr}$$

W powyższych równaniach v i *i* są, odpowiednio, macierzami 3x1 napięcia i prądu, a λ jest macierzą 3x3 strumieni. Indeks *s* odnosi się do zmiennych i parametrów związanych z obwodami stojana, a indeks *r* odnosi się do zmiennych i parametrów związanych z obwodami wirnika. Składniki r_s oraz r_r oznaczają macierze 3x3 rezystancji stojana i wirnika, z których każda ma równe, niezerowe elementy, a *p* jest operatorem różnicowania.

W przypadku układu magnetycznie liniowego, sprzężenia strumienia można wyrazić jako

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abcs} \\ \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{s} & \boldsymbol{L}_{sr} \\ \left(\boldsymbol{L}_{sr} \right)^{T} & \boldsymbol{L}_{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i}_{abcs} \\ \boldsymbol{i}_{abcr} \end{bmatrix}$$
(3)

Wówczas równania napięcia (1) i (2) wyrażone w zmiennych maszynowych (naturalnych), odnoszących się do uzwojeń stojana, przyjmują postać:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abcs} \\ \mathbf{v}'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s} + \mathbf{p}\mathbf{L}_{s} & \mathbf{p}\mathbf{L}'_{sr} \\ \mathbf{p}\left(\mathbf{L}'_{sr}\right)^{T} & \mathbf{r}'_{r} + \mathbf{p}\mathbf{L}'_{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}_{abcr} \end{bmatrix}$$
(4)

gdzie indukcyjności *L* oznaczają odpowiednie indukcyjności własne i wzajemne.

Równanie momentu obrotowego w zmiennych maszynowych

Energię zgromadzoną w polu magnetycznym można zapisać jako równą:

$$W_{f} = \frac{1}{2} (i_{abcs})^{T} L_{s} i_{abcs} + \frac{1}{2} (i'_{abcr})^{T} L_{r} i'_{abcr} + (i_{abcs})^{T} L'_{sr} i'_{abcr}$$
(5)

Moment obrotowy zaś w postaci rozszerzonej określa równanie [13]:

$$T_{e} = -\frac{P}{2}L_{ms} \left\{ (i_{as}i_{ar} + i_{bs}i_{br} + i_{cs}i_{cr}) sin\vartheta + (i_{as}i_{br} + i_{bs}i_{cr} + i_{cs}i_{ar}) sin(\vartheta - 2\pi/3) + (i_{as}i_{cr} + i_{bs}i_{ar} + i_{cs}i_{br}) sin(\vartheta + 2\pi/3) \right\}$$

$$(6)$$

gdzie ϑ jest kątem między osiami związanymi ze stojanem i wirnikiem, a *P* jest liczbą biegunów (nie mylić z operatorem różniczkowania *p*).

(1) Modelowanie *dq* maszyny 3-fazowej

(2)

Równania i parametry maszyny indukcyjnej zwykle przekształca się z postaci zmiennych maszynowych (naturalnych) do postaci układu wirującego osi prostopadłych *dq*0 za pomocą transformacji Parka. Dzięki zastosowaniu transformacji Parka do równań wiążących napięcia, prądy, strumienie, indukcyjności oraz rezystancje stojana i wirnika uproszczone równania 3-fazowej maszyny indukcyjnej przybierają postać: napięcia stojana

$$\begin{aligned}
\nu_{ds} &= -r_{s}i_{ds} + p\psi_{ds} \\
\nu_{qs} &= -r_{s}i_{qs} + p\psi_{qs} \\
\nu_{os} &= -r_{s}i_{os} + p\psi_{os}
\end{aligned}$$
(7)

napięcia wirnika

$$\begin{aligned}
v_{dr} &= r_r' i_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + p \psi_{dr} \\
v_{qr} &= r_r' i_{qr} + \omega_r \psi_{dr} + p \psi_{qr} \\
v_{0r} &= r_r' i_{0r} + p \psi_{0r}
\end{aligned} \tag{8}$$

gdzie ω_r jest prędkością wirnika, a ψ to odpowiednie strumienie stojana i wirnika w osiach dq0.

Ponieważ rozważana maszyna indukcyjna jest maszyną klatkową, napięcia wirnika (składowe napięć wirnika) są równe 0. Wówczas zmodyfikowane równania wirnika przyjmują postać

$$0 = r_r' i_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + p \psi_{dr}$$

$$0 = r_r' i_{qr} + \omega_r \psi_{dr} + p \psi_{qr}$$

$$0 = r_r' i_{xy0r} + p \psi_{xy0r}$$
(9)

Równanie momentu obrotowego w układzie odniesienia *dq*0

W przypadku układu o zrównoważonym obciążeniu (układu symetrycznego) równanie momentu obrotowego składa się wyłącznie z elementów (składowych) w osiach *dq*, tzn. moment obrotowy nie zawiera składowej zerowej

$$T_e = 3 \left(\frac{P}{2}\right) L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr})$$

$$T_e = P L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr})$$
(10)

Analiza modelu pełnego z uwzględnieniem nasycenia skrośnego

Chcąc uwzględnić efekt nasycenia skrośnego, należy skupić się na podstawowym obwodzie magnetycznym maszyny indukcyjnej obejmującym stojan i wirnik. Składowa podłużna strumienia wzajemnego powoduje wzrost podłużnej składowej napięcia, określonej następującym równaniem:

$$\nu_{md} = \frac{d\psi_{md}}{dt} = \frac{d(L_m i_{md})}{dt}$$
(11)

Po zróżniczkowaniu iloczynu indukcyjności magnesowania $L_{\rm m}$ i prądu magnesowania w osi d $i_{\rm md}$ równanie (11) przyjmuje postać:

$$\frac{d(L_m i_{md})}{dt} = i_{md} \frac{dL_m}{dt} + Lm \frac{di_{md}}{dt}$$
(12)

W celu uproszczenia powyższego wyrażenia, pochodną po czasie indukcyjności magnesowania można zapisać jako równą

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt}$$
(13)

Prąd magnesowania maszyny indukcyjnej jest sumą prądu w osi podłużnej i w osi poprzecznej i jest on równy $|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2}$.

Uwzględniając równania (12) i (13), pochodną po czasie prądu magnesowania można zapisać jako równą

$$\frac{d\left|i_{m}\right|}{dt} = \left(i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt}\right) / \left|i_{m}\right|$$
(14)

Poprzez podstawienie (14) do (13) uzyskuje się

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{1}{|i_m|} (i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt})$$
(15)

Powyższe wyrażenie można podstawić do równania (12), otrzymując

$$v_{md} = i_{md} \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{1}{|i_m|} (i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt}) + L_m \frac{di_{md}}{dt}$$
(16)

Po przekształceniu równania (16) uzyskuje się

$$\mathbf{v}_{md} = \left(\frac{i_{md}}{i_{mq}}\frac{i_{mq}i_{md}}{|i_{m}|}\frac{dL_{m}}{d|i_{m}|} + L_{m}\right)\frac{di_{md}}{dti}$$
$$+ \left(\frac{i_{md}i_{mq}}{d|i_{m}|}\frac{dL_{m}}{dt_{m}|}\right)\frac{di_{mq}}{dt}$$
(17)

$$\mathbf{v}_{md} = \left(\frac{i_{md}}{i_{mq}}L_{dq} + L_m\right)\frac{di_{md}}{dt} + \left(L_{dq}\right)\frac{di_{mq}}{dt} \qquad (18)$$

9)



This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 51–56. When referring to the article please refer to the original text.

$$\mathbf{v}_{md} = \left(L_{mD}\right) \frac{di_{md}}{dt} + \left(L_{dq}\right) \frac{di_{mq}}{dt} \tag{1}$$

Podobnie dla osi q uzyskujemy

$$\mathbf{v}_{mq} = \left(L_{mQ}\right) \frac{di_{mq}}{dt} + \left(L_{dq}\right) \frac{di_{md}}{dt} \tag{20}$$

gdzie:

$$L_{mD} = \frac{i_{md}}{i_{mq}} L_{dq} + L_m \text{ oraz } L_{mQ} = \frac{i_{mq}}{i_{md}} L_{dq} + L_m$$

Jedynym elementem odpowiedzialnym za (modelującym) efekt nasycenia skrośnego jest indukcyjność L_{da} . Jeśli wartość indukcyjności L_{dq} jest równa 0, wówczas równanie modelu nasyconego będzie wyglądać jak model uproszczony $L_{mD} = L_{mQ}$, $L_{sD} = L_{sQ}$, $L_{rd} = L_{rq}$ oraz $L_r = L_{lr} + L_m$. Wartość L_{dq} można określić za pomocą indukcyjności magnesowania L_m i indukcyjności dynamicznej L. Indukcyjność magnesowania L_m i indukcyjność dynamiczna *L* są statyczną nieliniową funkcją prądu magnesowania, zdefiniowaną funkcjami $L_m = f_1(i_m)$ i $L = f_2(i_m)$. Funkcję $L_m = f_1(i_m)$ można uzyskać z próby prędkości synchronicznej, podając różne napięcie zasilania na stojan maszyny indukcyjnej, utrzymując prędkość synchroniczną jej wirnika, np. za pomocą maszyny d.c. lub dowolnego napędu o stałej prędkości [5]. Dla różnych wartości napięcia stojana rejestruje się różne wartości mocy i prądu w celu wykreślenia krzywej L_m . Natomiast indukcyjność L można określić z $L_m = f_1(i_m)$ przy użyciu poniższych zależności:

$$L_{dq} = \frac{i_{md}i_{mq}}{\left|i_{m}\right|} \frac{dL_{m}}{d\left|i_{m}\right|}$$
(21)

$$L = \frac{d\psi_m}{di_m} = \frac{d(L_m i_m)}{di_m} = i_m \frac{dL_m}{di_m} + L_m$$
(22)

$$i_m \frac{dL_m}{di_m} = L - L_m \tag{23}$$

Zmienność indukcyjności magnesowania i indukcyjności dynamicznej jako funkcji prądu magnesowania pokazano na rys. 1. Parametry maszyny indukcyjnej zaczerpnięto z publikacji [2]. Odnoszą się one do 3-fazowej maszyny indukcyjnej z pierścieniem ślizgowym o mocy 1,5 kW [2].

Pełny model 3-fazowego generatora indukcyjnego z uwzględnieniem efektu nasycenia skrośnego jest zdefiniowany



Rys. 1. Zmienność nasyconej indukcyjności magnesowania (Lm), indukcyjności dynamicznej (L) i różnicy indukcyjności L-Lm w funkcji prądu magnesowania [tłum. Inductance Curves – krzywe indukcyjności, Inductance (H) – indukcyjność (H), Current (Ampere) – prąd (w A)]

równaniami (24)–(29). Model uproszczony można uzyskać, eliminując efekt indukcyjności nasycenia skrośnego L_{dq} .

$$v_{ds} = r_{s}i_{ds} + L_{sD}pi_{ds} + L_{dq}pi_{qs} + L_{mD}pi_{dr} + L_{dq}pi_{qr}$$
(24)

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + L_{dq} p i_{ds} + L_{sQ} p i_{qs} + L_{dq} p i_{dr} + L_{mQ} p i_{qr}$$

$$v_{os} = r_{s}i_{os} + L_{ls}pi_{os}$$
(26)

$$D = r_{r}i_{dr} + \omega_{r}(L_{r}i_{qr} + L_{m}i_{qs}) + L_{mD}pi_{ds} + L_{dq}pi_{qs} + L_{rd}pi_{dr} + L_{dq}pi_{qr}$$
(27)

$$\begin{split} O &= r_r i_{qr} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) + L_{dq} p i_{ds} + L_{mQ} p i_{qs} \\ &+ L_{dq} p i_{dr} + L_{rq} p i_{qr} \end{split}$$

(28)

$$0 = r_r i_{0r} + L_{lr} p i_{0r}$$
⁽²⁹⁾

Poniższe rysunki pokazują odpowiedzi modelu 3-fazowego generatora indukcyjnego na różne stany/procesy ruchowe i zakłóceniowe.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono proces samowzbudzenia nieobciążonego 3-fazowego generatora SEIG dla pełnego modelu nieliniowego, uwzględniającego efekt nasycenia skrośnego. Do stojana maszyny przyłączono kondensatory bocznikowe o wartości 36 μ F. Kondensatory te dobrano tak, aby umożliwić osiągnięcie napięcia znamionowego na zaciskach maszyny bez obciążenia, gdy generator napędzany jest z prędkością znamionową. Na rys. 4 widać, że generowane napięcia 3-fazowe są sinusoidalne i wolne od jakichkolwiek zniekształceń.

Na rys. 4 i 5 pokazano przebieg napięcia na zaciskach stojana po załączeniu 3-fazowego obciążenia rezystancyjnego o wartości $R = 32 \Omega$, w chwili t = 2 s. Widać, że napięcie na zaciskach maszyny spada po przyłożeniu obciążenia, chociaż przed upływem czasu t = 2 s proces narastania napięcia (samowzbudzenia) już się zakończył.

W generatorach asynchronicznych z kondensatorami bocznikowymi nie można regulować napięcia na zaciskach. Napięcie to zależy od obciążenia. Aby przezwyciężyć problem braku możliwości bezpośredniej regulacji napięcia w generatorach SEIG, rozważa się wiele elektronicznych sterowników mocy oraz szeregowych i równoległych układów przyłączenia pojemności. Informacje na ten temat znaleźć można w [1].

Na rys. 6 i 7 przedstawiono przebieg prądu obciążenia. Wyraźnie widać, że przed załączeniem obciążenia prąd jest równy 0, a po bardzo krótkim okresie przejściowym rośnie do wartości znamionowej.

Na koniec na rys. 8 zaprezentowano przebieg indukcyjności *L* i prądu magnesowania i_m w czasie. Krzywe te dotyczą procesu samowzbudzenia SEIG i załączenia obciążenia rezystancyjnego w chwili t = 2 s. Charakterystyki te są zbliżone do charakterystyk uzyskanych dla układów eksperymentalnych, a dyskutowanych w literaturze [2, 6, 7].





Rys. 2. Przebieg napięcia biegu jałowego 3-fazowego generatora SEIG [tłum. Terminal voltage at no load – napięcie jałowe na zaciskach, Terminal voltage – napięcie na zaciskach, Time (seconds) – czas (s)]



Rys. 4. Napięcie na zaciskach 3-fazowego generatora SEIG po załączeniu obciążenia w chwili t = 2 s [tłum. Terminal voltage at no load – napięcie jałowe na zaciskach, Terminal Voltage – napięcie na zaciskach, Time (seconds) – czas (s)]



Rys. 6. Prąd obciążenia 3-fazowego generatora SEIG [tłum. Load Current – prąd obciążenia, Time (seconds) – czas (w sekundach)]



Rys. 3. Powiększony widok napięć 3-fazowych generowanych na biegu jałowym (bez obciążenia) [tłum. Terminal voltage at no load – napięcie jałowe na zaciskach, Terminal voltage – napięcie na zaciskach, Time (seconds) – czas (s)]



Rys. 5. Powiększony widok napięć po załączeniu obciążenia 3-fazowego [tłum. Terminal voltage at no load – napięcie jałowe na zaciskach, Terminal Voltage – napięcie na zaciskach, Time (seconds) – czas (s)]



Rys. 7. Rozszerzony widok prądu obciążenia po załączeniu obciążenia [tłum. Load Current – prąd obciążenia, Time (seconds) – czas (w sekundach)]

PL



Rys. 8. Indukcyjność dynamiczna L, składowa poprzeczna indukcyjności magnesowania L_{dq} , indukcyjność magnesowania L_{m} i prąd magnesowania i_{m} [tłum. Dynamic inductance L – indukcyjność dynamiczna, Inductance – indukcyjność, Time – czas, Magnetizing inductance Lm – indukcyjność magnesowania L_{m}]

Wniosek

W artykule przedstawiono model matematyczny 3-fazowego samowzbudnego generatora indukcyjnego (SEIG), uwzględniający efekt dynamicznej zmiany indukcyjności nasycenia skrośnego. W pracy, której jednym z efektów jest niniejszy artykuł, analizowano wpływ różnych parametrów badanego 3-fazowego generatora SEIG na proces samowzbudzenia. Modele maszyny indukcyjnej klatkowej - pełny i uproszczony – dają podobne wyniki w stanach ustalonych, ale w stanach przejściowych różnice są dość wyraźne. Zmienne w trakcie pracy maszyny, a wynikające ze zmienności obciążenia, 3-fazowe napięcie stojana można ustabilizować (regulować) za pomocą przetwornic AC-DC-AC. Maszyny SEIG można przyłączać do sieci bezpośrednio, gdy odbiory nie wymagają stałej częstotliwości napięcia lub regulację częstotliwości w sieci realizują inne urządzenia (zespoły wytwórcze).

Podziękowanie

Autorzy dziękują Council of Scientific and Industrial Research w New Delhi za wsparcie finansowe w kategorii Direct CSIR-SRF (09/112 (0610) 2K19 EMR-1).

Bibliografia

- Khan M.F., Khan M.R., Voltage control of single-phase two winding self-excited induction generator for isolated loads [Regulacja napięcia 1-fazowego samowzbudnego generatora indukcyjnego z podwójnym uzwojeniem przy obciążeniach izolowanych], Int. Conf. Adv. Energy Convers. Technol., 2014, s. 209–214.
- Khan M.F., Khan M.R., Analysis of voltage build-up and speed disturbance ride through capability of a self-excited induction generator for renewable energy application [Analiza narastania napięcia i zdolności do pracy pomimo zakłóceń prędkości samowzbudnego generatora indukcyjnego przy zastosowaniach w energetyce odnawialnej], *Int. J. Power Energy Convers.* 2016, Vol. 7, No. 2, s. 157.
- Bodson M., Kiselychnyk O., Analysis of triggered self-excitation in induction generators and experimental validation [Analiza wyzwalanego samowzbudzenia w generatorach indukcyjnych i weryfikacja eksperymentalna], *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2012, Vol. 27, No. 2, s. 238–249.

- 4. Khan M.F., Khan M.R., Analysis of a six-phase self-excited induction generator supplying RL load with short shunt connection [Analiza 6-fazowego samowzbudnego generatora indukcyjnego zasilającego obciążenie RL z krótkim przyłączem bocznikowym], IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2016, 2017, s. 1–5.
- Hallenius K.E., Vas P., Brown J.E., The analysis of a saturated self-excited asynchronous generator [Analiza nasyconego samowzbudnego generatora asynchronicznego], *IEEE Transactions on Energy Conversion* 1991, Vol. 6, No. 2, s. 336–345.
- Kiselychnyk O., Bodson M., Wang J., Comparison of Two Magnetic Saturation Models of Induction Machines and Experimental Validation [Porównanie dwóch modeli nasycenia magnetycznego maszyn indukcyjnych i weryfikacja eksperymentalna], *IEEE Transactions* on Industrial Electronics 2017, Vol. 64, No. 1, s. 81–90.
- Levi E., Impact of cross saturation on accuracy of saturated induction machine models [Wpływ nasycenia skrośnego na dokładność modeli nasyconych maszyn indukcyjnych],

IEEE Power Engineering Review 1997, Vol. 17, No. 2, s. 32.

- Almarshoud A.F., Abdel-Halim M.A., Alolah A.I., Including Effects Of Cross-Saturation And Leakage Path Saturation Together In The Generalized Model Of Three Phase Induction Machine [Łączne uwzględnienie efektów nasycenia skrośnego i nasycenia ścieżki rozproszenia w uogólnionym modelu 3-fazowej maszyny indukcyjnej], Can. Conf. Electr. Comput. Eng., 2001, s. 195–200.
- Wang L., Jatskevich J., Including magnetic saturation in voltagebehind-reactance induction machine model for EMTP-type solution [Uwzględnienie nasycenia magnetycznego w modelu "napięcia za reaktancją" maszyny indukcyjnej dla rozwiązania typu EMTP], IEEE

Transactions on Power Systems 2010, Vol. 25, No. 2, s. 975–987.

- 10. Graus J., Hahn I., A new method for the estimation of the influence of stator saturation on the differential inductances [Nowa metoda szacowania wpływu nasycenia stojana na indukcyjności różnicowe], Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013, s. 952–959.
- Che H.S. i in., Experimental magnetizing inductance identification in five-phase induction machines [Eksperymentalna identyfikacja indukcyjności magnesowania w 5-fazowych maszynach indukcyjnych], IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2013, s. 5179–5184.
- 12. Khan M.F., Khan M.R., Iqbal A., Performance analysis of shunt, short shunt and long shunt self-excited induction generator: Analysis of shunt, short shunt and long shunt SEIG [Analiza wydajności samowzbudnego generatora z bocznikiem, bocznikiem krótkim i bocznikiem długim: Analiza bocznika, bocznika krótkiego i bocznika długiego generatora SEIG], PEDES 2012 – IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst., 2012.
- Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S., Analysis of Electric Machinery and Drive Systems [Analiza elektrycznych maszyn i układów napędowych], 2002.

Mohd Sartaj

Wydział Elektryczny, Aligarh Muslim University, Aligarh, Indie

e-mail: msartaj@myamu.ac.in

Uzyskał licencjat i magisterium z inżynierii elektrycznej na Aligarh Muslim University (AMU) w Indiach (2013, 2016). Obecnie pracuje nad doktoratem z technologii napędów maszyn wielofazowych.

Mohd Rizwan Khan

Wydział Elektryczny, Aligarh Muslim University, Aligarh, Indie

e-mail: mrkhan.ee@amu.ac.in

Uzyskał licencjat i magisterium z inżynierii elektrycznej i doktorat na Aligarh Muslim University (AMU) w Indiach (1998, 2001, 2008). Jego praca doktorska dotyczyła napędów wielofazowych. Obecnie jest profesorem na Wydziale Elektrycznym Uniwersytetu AMU. Jego zainteresowania badawcze obejmują energoelektronikę, sztuczną inteligencję i wielofazowe napędy silnikowe. Opublikował ponad 120 artykułów na międzynarodowych i krajowych konferencjach oraz w czasopismach, w tym trzy w *IEEE Transactions*.

Mohd Faisal Khan

Wydział Elektryczny, University Polytechnic, Aligarh Muslim University, Aligarh, India

e-mail: mfaisal_khan@yahoo.com

Uzyskał licencjat w dziedzinie inżynierii elektrycznej na Jamia Millia Islamia University w New Delhi, w Indiach (1999) oraz magisterium i doktorat na Aligarh Muslim University w Indiach (2004, 2015). Obecnie jest adiunktem na Wydziale Elektrycznym Aligarh Muslim University. Ma ponad 15 lat doświadczenia w nauczaniu i badaniach. Jego zainteresowania badawcze obejmują maszyny elektryczne, samodzielne i połączone z siecią systemy konwersji energii wiatrowej WECS, wielofazowe maszyny i napędy elektryczne, analizy maszyn elektrycznych oparte na Matlab Simulink. Jest autorem lub współautorem ok. 30 publikacji naukowych i członkiem różnych organizacji zawodowych, takich jak IETI, IACSIT i IAENG.