

O.Z.I. Abu Ibaid, S. Belhamdi, M. Abid, S. Chakroune, S. Mouassa, Z.S. Al-Sagar

**Wavelet packet analysis for rotor bar breakage in an inverter induction motor**

**Introduction.** In various industrial processes, squirrel cage induction motors are widely employed. These motors can be used in harsh situations, such as non-ventilated spaces, due to their high strength and longevity. These machines are subject to malfunctions such as short circuits and broken bars. Indeed, for the diagnosis several techniques are offered and used. **Novelty** of the proposed work provides the use of wavelet analysis technology in a continuous and discrete system to detect faults affecting the rotating part of an induction motor fed by a three-phase inverter. **Purpose.** This paper aims to present a novel technique for diagnosing broken rotor bars in the low-load, stationary induction machine proposed. The technique is used to address the problem of using the traditional Techniques like Fourier Transforms signal processing algorithm by analyzing the stator current envelope. The suggested method is based on the use of discrete wavelet transform and continuous wavelet transform. **Methods.** A waveform can be monitored at any frequency of interest using the suggested discrete wavelet transform and continuous wavelet transform. To identify the rotor broken bar fault, stator current frequency spectrum is analyzed and then examined. Based on a suitable index, the algorithm separates the healthy motor from the defective one, with 1, 2 and 3 broken bars at no-load. **Results.** In comparison to the healthy conditions, the recommended index significantly raises under the broken bars conditions. It can identify the problematic conditions with clarity. The possibility of detecting potential faults has been demonstrated (broken bars), using discrete wavelet transform and continuous wavelet transform. The diagnostic method is adaptable to temporary situations brought on by alterations in load and speed. Performance and efficacy of the suggested diagnostic method are demonstrated through simulation in Simulink® MATLAB environment. References 31, figures 11.

**Key words:** squirrel cage induction motors, rotor broken bar, continuous wavelet transform, discrete wavelet transform.

**Вступ.** У різних промислових процесах широко використовуються асинхронні двигуни із короткозамкненим ротором. Ці двигуни можуть використовуватися в суворих умовах, наприклад, в приміщеннях, що не вентилюються, завдяки їх високій міцності і довговічності. Ці машини схильні до несправностей, таких як коротке замикання і зламані стрижні. Зрозуміло, що для діагностики пропонується та використовується кілька методик. **Новизна** запропонованої роботи полягає у використанні технології вейвлет-аналізу в безперервній і дискретній системі для виявлення несправностей, що впливають на частину асинхронного двигуна, що обертається, що живиться від трифазного інвертора. **Мета.** У цій статті представлена нова методика діагностики зламаних стрижнів ротора в малонавантаженої стаціонарній асинхронній машині. Цей метод використовується для вирішення проблеми використання традиційних методів, таких як алгоритм обробки сигналів перетворення Фур'є, шляхом аналізу огибаючої струму статора. Пропонуваний метод заснований на використанні дискретного вейвлет-перетворення та безперервного вейвлет-перетворення. **Методи.** Форма сигналу може відстежуватися на будь-якій частоті, що цікавить, з використанням запропонованого дискретного вейвлет-перетворення і безперервного вейвлет-перетворення. Для виявлення несправності обриву стрижня ротора частотний спектр статора аналізується, а потім досліджується. На основі відповідного індексу алгоритм відокремлює справний двигун від несправного з 1, 2 і 3 зламаними стрижнями на холостому ході. **Результати.** Порівняно із нормальними умовами рекомендований показник значно підвищується за умов зламаних стрижнів. Він може чітко визначити проблемні умови. Було продемонстровано можливість виявлення потенційних несправностей (зламани стрижні) з використанням дискретного вейвлет-перетворення та безперервного вейвлет-перетворення. Метод діагностики адаптується до тимчасових ситуацій, викликаних змінами навантаження та швидкості. Працездатність та ефективність запропонованого методу діагностики продемонстровано за допомогою моделювання у середовищі Simulink® MATLAB. Бібл. 31, рис. 11.

**Ключові слова:** асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, зламаний стрижень ротора, безперервне вейвлет-перетворення, дискретне вейвлет-перетворення.

## REFERENCES

- Dehina W., Boumehraz M., Kratz F. Diagnosis of Rotor and Stator Faults by Fast Fourier Transform and Discrete Wavelet in Induction Machine. *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2018, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2018.8613311>.
- Rohan A., Kim S.H. Fault Detection and Diagnosis System for a Three-Phase Inverter Using a DWT-Based Artificial Neural Network. *The International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 238-245. doi: <https://doi.org/10.5391/IJFIS.2016.16.4.238>.
- Bessam B., Menacer A., Boumehraz M., Cherif H. DWT and Hilbert Transform for Broken Rotor Bar Fault Diagnosis in Induction Machine at Low Load. *Energy Procedia*, 2015, vol. 74, pp. 1248-1257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.769>.
- Amanuel T., Ghirmay A., Ghebremeskel H., Ghebrehiwet R., Bahlibi W. Comparative Analysis of Signal Processing Techniques for Fault Detection in Three Phase Induction Motor. *Journal of Electronics and Informatics*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 61-76. doi: <https://doi.org/10.36548/jei.2021.1.006>.
- Menacer A., Moreau S., Benakcha A., Said M.S.N. Effect of the Position and the Number of Broken Bars on Asynchronous Motor Stator Current Spectrum. *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006, pp. 973-978. doi: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.4778526>.
- Talhaoui H., Ameid T., Kessal A. Energy eigenvalues and neural network analysis for broken bars fault diagnosis in induction machine under variable load: experimental study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2022, vol. 13, no. 5, pp. 2651-2665. doi: <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03172-2>.
- Ince T. Real-time broken rotor bar fault detection and classification by shallow 1D convolutional neural networks. *Electrical Engineering*, 2019, vol. 101, no. 2, pp. 599-608. doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00808-7>.
- Talhaoui H., Ameid T., Aissa O., Kessal A. Wavelet packet and fuzzy logic theory for automatic fault detection in induction motor. *Soft Computing*, 2022, vol. 26, no. 21, pp. 11935-11949. doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07028-5>.
- Abid M., Laribi S., Larbi M., Allaoui T. Diagnosis and localization of fault for a neutral point clamped inverter in wind energy conversion system using artificial neural network technique. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 55-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.09>.
- Kompella K.C.D., Mannam V.G.R., Rayapudi S.R. DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 411-427. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.07.002>.
- Saidi L., Fnaiech F., Henaoui H., Capolino G.-A., Cirrincione G. Diagnosis of broken-bars fault in induction machines using higher order spectral analysis. *ISA Transactions*, 2013, vol. 52, no. 1, pp. 140-148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2012.08.003>.
- Bouzida A., Touhami O., Abdelli R. Rotor Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors Using the Wavelet Transform.

## Abstract and References

- International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'13). Proceedings Engineering & Technology*, 2013, vol. 1, pp. 186-191. Available at: [http://ipco-co.com/PET\\_Journal/presented%20papers/095.pdf](http://ipco-co.com/PET_Journal/presented%20papers/095.pdf) (accessed 24 July 2022).
13. Dehina W., Boumehraz M., Kratz F. Diagnosis and Detection of Rotor Bars Faults in Induction Motor Using HT and DWT Techniques. *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2021, pp. 109-115. doi: <https://doi.org/10.1109/SSD52085.2021.9429381>.
14. Hussein A.M., Obed A.A., Zubo R.H.A., Al-Yasir Y.I.A., Saleh A.L., Fadhel H., Sheikh-Akbari A., Mokryani G., Abd-Alhameed R.A. Detection and Diagnosis of Stator and Rotor Electrical Faults for Three-Phase Induction Motor via Wavelet Energy Approach. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 8, art. no. 1253. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11081253>.
15. Cherif H., Menacer A., Bessam B., Kechida R. Stator inter turns fault detection using discrete wavelet transform. *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2015, pp. 138-142. doi: <https://doi.org/10.1109/DEMPEP.2015.7303681>.
16. Hassen K., Braham A., Zied L. Diagnosis of broken rotor bar in induction machines using pitch synchronous wavelet transform. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2013, pp. 896-901. doi: <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635729>.
17. Eltabach M., Charara A., Zein I. A Comparison of External and Internal Methods of Signal Spectral Analysis for Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, no. 1, pp. 107-121. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.822083>.
18. Didier G., Ternisien E., Caspary O., Razik H. Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, vol. 42, no. 1, pp. 79-88. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.861368>.
19. Abu Ibaid O.Z.I., Belhamdi S., Abid M., Chakroune S. Diagnosis of rotor faults of asynchronous machine by spectral analysis of stator currents. *5th International Aegean Symposium on Innovation Technologies & Engineering*, February 25-26, 2022, pp. 102-111. Available at: [https://www.aegeanconference.com/files/ugd/614b1f\\_1930a1802a034e389c403c987ca63644.pdf](https://www.aegeanconference.com/files/ugd/614b1f_1930a1802a034e389c403c987ca63644.pdf) (accessed 24 July 2022).
20. Choudira I., Khodja D., Chakroune S. Fuzzy Logic Based Broken Bar Fault Diagnosis and Behavior Study of Induction Machine. *Journal Européen Des Systèmes Automatisés*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 233-242. doi: <https://doi.org/10.18280/jesa.530210>.
21. Souad L., Bendiabdallah Youcef M., Samir M., Boukezata. Use of neuro-fuzzy technique in diagnosis of rotor faults of cage induction motor. *2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B)*, 2017, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEE-B.2017.8192148>.
22. Abdelhak G., Sid Ahmed B., Djekidel R. Fault diagnosis of induction motors rotor using current signature with different signal processing techniques. *Diagnostyka*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.29354/diag/147462>.
23. Chow T.W.S., Hai S. Induction Machine Fault Diagnostic Analysis With Wavelet Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, no. 3, pp. 558-565. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.825325>.
24. Mohamed M.A., Hassan M.A.M., Albalawi F., Ghoneim S.S.M., Ali Z.M., Dardeer M. Diagnostic Modelling for Induction Motor Faults via ANFIS Algorithm and DWT-Based Feature Extraction. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 19, art. no. 9115. doi: <https://doi.org/10.3390/app11199115>.
25. Kechida R., Menacer A. DWT wavelet transform for the rotor bars faults detection in induction motor. *2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, 2011, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/EPECS.2011.6126825>.
26. Kompella K.C.D., Mannam V.G.R., Rayapudi S.R. DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 411-427. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.07.002>.
27. Behim M., Merabet L., Saad S. Detection and Classification of Induction Motor Faults Using DWPD and Artificial Neural Network: Case of Supply Voltage Unbalance and Broken Rotor Bars. *EasyChair Preprint no. 7756*. Available at: [https://easychair.org/publications/preprint\\_download/TrtH](https://easychair.org/publications/preprint_download/TrtH) (accessed 24 July 2022).
28. Mehrjou M.R., Mariun N., Karami M., Noor S.B.M., Zolfaghari S., Mison N., Kadir M.Z.A.A., Radzi M.A.M., Marhaban M.H. Wavelet-Based Analysis of MCSA for Fault Detection in Electrical Machine. In *Wavelet Transform and Some of Its Real-World Applications. InTech*, 2015. doi: <https://doi.org/10.5772/61532>.
29. Cusido J., Romeral L., Ortega J.A., Rosero J.A., Espinosa A.G. Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 2, pp. 633-643. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911960>.
30. Amanuel T., Ghirmay A., Ghebremeskel H., Ghebrehwet R., Bahlibi W. Comparative Analysis of Signal Processing Techniques for Fault Detection in Three Phase Induction Motor. *Journal of Electronics and Informatics*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 61-76. doi: <https://doi.org/10.36548/jei.2021.1.006>.
31. Martinez-Herrera A.L., Ferrucho-Alvarez E.R., Ledesma-Carrillo L.M., Mata-Chavez R.I., Lopez-Ramirez M., Cabal-Yepez E. Multiple Fault Detection in Induction Motors through Homogeneity and Kurtosis Computation. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 4, art. no. 1541. doi: <https://doi.org/10.3390/en15041541>.

Received 24.09.2022

Accepted 23.12.2022

Published 06.05.2023

Ossama Ziad Ibrahim Abu Ibaid<sup>1</sup>, PhD,

Saad Belhamdi<sup>1</sup>, Professor,

Mimouna Abid<sup>2</sup>, PhD,

Salim Chakroune<sup>1</sup>, Professor,

Souhil Mouassa<sup>3</sup>, Senior Lecturer,

Zuhair S. Al-Sagar<sup>4</sup>, Associate Professor,

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering,

Electrical Engineering Laboratory, University of M'Sila, Algeria,

e-mail: osama.abuibaid@univ-msila.dz;

saad.belhamdi@univ-msila.dz; salim.chakroun@univ-msila.dz

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering,

L2GEGI Laboratory, University of Tiaret, Algeria,

e-mail: mimouna.abid@univ-tiaret.dz (Corresponding Author)

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering,

University of Bouira, Algeria,

e-mail: souhil.mouassa@univ-bouira.dz

<sup>4</sup> Department of Renewable Energy,

Baqubah Technical Institute, Middle Technical University,

Baghdad, Iraq.

e-mail: Zuhairalsagar@mtu.edu.iq

### How to cite this article:

Abu Ibaid O.Z.I., Belhamdi S., Abid M., Chakroune S., Mouassa S., Al-Sagar Z.S. Wavelet packet analysis for rotor bar breakage in an inverter induction motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 3-11. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.01>

V.I. Milykh, V.P. Shaida, O.Yu. Yurieva

## Analysis of the thermal state of the electromagnetic mill inductor with oil cooling in stationary operation modes

**Introduction.** An electromagnetic mill (EMM) for the technological processing of various substances, which is based on the stator of a three-phase induction motor, is being studied. The stator winding has an increased current density, so the mill is provided with a system of forced cooling with transformer oil. **Problem.** Currently, there are no works on the thermal state calculation of the EMM with the given design and oil cooling. Therefore, the study of such EMMs thermal state is relevant, as it will contribute to increasing the reliability and efficiency of their work. **Goal.** Formation of a mathematical model of the thermal state of the electromagnetic mill inductor and the analysis of its heating in stationary modes of operation with cooling by transformer oil. **Methodology.** The problem of calculating the thermal state, namely the temperature distribution in the main parts of the electromagnetic mill, is solved by the equivalent thermal resistance circuit method. The design of the EMM is provided in a sufficiently complete volume, and on this basis, a corresponding equivalent thermal replacement circuit is formed, which is supplemented by an equivalent hydraulic circuit of oil passageways. An explanation is provided for the composition and solution of the equations algebraic system that describes the distribution of temperatures by the constituent elements of the EMM. **Results.** The thermal calculation results of the electromagnetic mill showed that the maximum heating temperature is much lower than the allowable one for the selected insulation class. According to the hydraulic scheme, the necessary oil consumption, its average speed and the corresponding pressure at the inlet of the intake pipe are determined, which are at an acceptable level. It is noted that the rather moderate temperature state of the inductor and the hydraulic parameters of the oil path are facilitated by such innovations in the design of the EMM as the loop double layer short chorded winding and axial ventilation channels in the stator core. **Originality.** Now EMM thermal equivalent circuits with air cooling only have been presented. Therefore, the developed thermal circuit of the oil-cooled inductor is new and makes it possible to evaluate the operating modes of the EMM. **Practical value.** The proposed technical solutions can be recommended for practical implementation in other EMMs. Taking into account the identified reserves of the EMM temperature state, a forecast was made regarding the transition from its oil cooling to air cooling. But the use of air cooling requires a change in the design of the EMM. References 34, tables 2, figures 5.

**Key words:** electromagnetic mill, forced cooling of the inductor with oil, analysis of the thermal state of the mill, method of equivalent thermal circuits, analysis of hydraulic parameters.

**Проблема.** Досліджується електромагнітний млин (ЕММ) для технологічної обробки різних речовин, який виконано на базі статора трифазного асинхронного двигуна. Обмотка статора має підвищену густину струму, тому для млина передбачена система примусового охолодження трансформаторною оливою. Наразі робіт з розрахунку теплового стану ЕММ з наданою конструкцією і охолодженням оливою не представлено. Тому дослідження теплового стану таких ЕММ є актуальним, бо сприятиме підвищенню надійності та ефективності їх роботи. **Метою** статті є формування математичної моделі теплового стану індуктора електромагнітного млина та аналіз його нагріву у стаціонарних режимах роботи з охолодженням трансформаторною оливою. **Задача** розрахунку теплового стану, а саме – розподілу температури в основних частинах індуктора електромагнітного млина, розв'язується методом еквівалентних теплових схем. Конструкція ЕММ надана у достатньо повному обсязі і на цій основі сформована відповідна еквівалентна теплова схема заміщення, яка доповнена еквівалентною гідравлічною схемою шляхів проходження оливи. Надано пояснення щодо складання та розв'язання алгебраїчної системи рівнянь, які описують розподіл температур по складовим елементам індуктора ЕММ. **Результати** теплового розрахунку індуктора ЕММ показали, що максимальна температура нагріву значно менша за допустиму для обраного класу нагрівостійкості ізоляції. За гідравлічною схемою індуктора визначено необхідні витрати оливи, її середню швидкість і відповідний тиск на вході у впускний патрубок, які знаходяться на допустимому рівні. Зазначено, що досить помірному температурному стану індуктора і гідравлічним параметрам тракту оливи сприяють такі нововведення в конструкцію ЕММ, як двошарова скорочена петльова обмотка статора і аксіальні вентиляційні канали в осерді статора. **Настепер** були представлені теплові еквівалентні схеми ЕММ лише з повітряним охолодженням. Тому розроблена теплова схема індуктора з охолодженням оливою є новою і дає можливість оцінки режимів роботи ЕММ. Бібл. 34, табл. 2, рис. 5.

**Ключові слова:** електромагнітний млин, примусове охолодження індуктора оливою, аналіз теплового стану млину, метод еквівалентних теплових схем, аналіз гідравлічних параметрів.

### REFERENCES

1. Logvinenko D.D., Sheljakov O.P. *Intensifikacija tehnologicheskikh processov v apparatah s vihrevym sloem* [Intensification of technological processes in apparatus with a vortex layer]. Kiev, Tehnika Publ., 1976. 144 p. (Rus).
2. Voitovich V.A., Kart M.A., Zakharychev E.A., Tarasov S.G. Vortex-layer devices as import-substituting equipment to produce paints and adhesives. *Polymer Science, Series D*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 153-155. doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421217020253>.
3. Wolosiewicz-Glab M., Foszcz D., Gawenda T., Ogonowski S. Design of an electromagnetic mill. Its technological and control system structures for dry milling. *E3S Web of Conferences*, 2016, vol. 8, art. no. 01066. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801066>.
4. Milykh V.I., Shilkova, L. V. Characteristics of a cylindrical inductor of a rotating magnetic field for technological purposes when it is powered from the mains at a given voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 2, pp. 13-19. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.02>.
5. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Kayumov R.A., Deberdeev T.R., Leksin V.V., Sprince A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 82, no. 6, pp. 191-198. doi: <https://doi.org/10.18720/MCE.82.17>.
6. Wolosiewicz-Glab M., Foszcz D., Saramak D., Gawenda T., Krawczykowski D. Analysis of a grinding efficiency in the electromagnetic mill for variable process and feed parameters. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 18, art. no. 01012. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171801012>.
7. Calus D., Makarchuk O. Analysis of interaction of forces of working elements in electromagnetic mill. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, vol. 95, no. 12, pp. 64-69. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2019.12.12>.

## Abstract and References

8. Wołosiewicz-Głąb M., Pięta P., Foszcz D., Niedoba T., Gawenda T. Adjustment of limestone grinding in an electromagnetic mill for use in production of sorbents for flue gas desulphurization. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 779-791. doi: <https://doi.org/10.5277/ppmp19011>.
9. Ogonowski S., Wołosiewicz-Głąb M., Ogonowski Z., Foszcz D., Pawełczyk M. Comparison of Wet and Dry Grinding in Electromagnetic Mill. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 4, art. no. 138. doi: <https://doi.org/10.3390/min8040138>.
10. Zhakirova N., Salakhov R., Sasykova L., Khamidullin R., Deberdeev T., Yalyshev U., Khamidi A., Seilkhanov T. Increasing the Yield of Light Distillates by Wave Action on Oil Raw Materials. *Eurasian Chemical-Technological Journal*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 125-132. doi: <https://doi.org/10.18321/ectj1083>.
11. Kovalev A.A., Kovalev D.A., Grigoriev V.S., Litt Y.V. The vortex layer apparatus as a source of low-grade heat in the process of pretreatment of the substrate before anaerobic digestion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 938, no. 1, art. no. 012004. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/938/1/012004>.
12. *Mixing machine AVS-100. Electromagnetic mill.* Available at: <https://globecore.com/products/magnetic-mill/mixing-machine-avs-100/> (Accessed 20.02.2022).
13. Ogonowski S., Ogonowski Z., Pawełczyk M. Multi-Objective and Multi-Rate Control of the Grinding and Classification Circuit with Electromagnetic Mill. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 4, art. no. 506. doi: <https://doi.org/10.3390/app8040506>.
14. Krawczykowski D., Foszcz D., Ogonowski S., Gawenda T., Wołosiewicz-Głąb M. Analysis of the working chamber size influence on the effectiveness of grinding in electromagnetic mill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 427, art. no. 012033. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/427/1/012033>.
15. Ogonowski S. On-Line Optimization of Energy Consumption in Electromagnetic Mill Installation. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 9, art. no. 2380. doi: <https://doi.org/10.3390/en14092380>.
16. Styła S., Mańko M. A reluctance model of an electromagnetic mill using the stator of an asynchronous motor as an inductor. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020, vol. 96, no. 1, pp. 254-257. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2020.01.58>.
17. Milykh V.I., Shilkova L.V. Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*, 2018, no. 5 (1281), pp. 104-109. (Ukr).
18. Makarchuk O., Calus D., Moroz V. Mathematical model to calculate the trajectories of electromagnetic mill operating elements. *Technical Electrodynamics*, 2021, no. 2, pp. 26-34. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.026>.
19. Milykh V.I., Shilkova L.V. Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 12-17. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.02>.
20. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B., Shuyskiy A. Improvement of Strength and Strain Characteristics of Lightweight Fiber Concrete by Electromagnetic Activation in a Vortex Layer Apparatus. *Applied Sciences*, 2021, vol. 12, no. 1, art. no. 104. doi: <https://doi.org/10.3390/app12010104>.
21. Krauze O., Buchezik D., Budzan S. Measurement-Based Modelling of Material Moisture and Particle Classification for Control of Copper Ore Dry Grinding Process. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 2, art. no. 667. doi: <https://doi.org/10.3390/s21020667>.
22. Styła S. Analysis of temperature distribution in electromagnetic mill. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, vol. 92, no. 3, pp. 103-106. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2016.03.25>.
23. Vlasov A.B., Mukhin E.A. Methodology for calculating the temperature of the windings of an electric machine based on quantitative thermography. *Vestnik of MSTU*, 2011, vol. 14, no. 4, pp. 671-680. (Rus).
24. Yang Y., Bilgin B., Kasprzak M., Nalakath S., Sadek H., Preindl M., Cotton J., Schofield N., Emadi A. Thermal management of electric machines. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 104-116. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0050>.
25. Lundmark S.T., Acquaviva A., Bergqvist A. Coupled 3-D Thermal and Electromagnetic Modelling of a Liquid-cooled Transverse Flux Traction Motor. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 2640-2646. doi: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506835>.
26. Milykh V.I., Tymin M.G. A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 4, pp. 12-18. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.02>.
27. Ostashevskiy N.A., Shayda V.P., Petrenko A.N. Research into thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor by means of a finite element method. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no. 5, pp. 39-42. (Rus).
28. Kazi S.N. (Ed.) *Heat Transfer Phenomena and Applications*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2012. doi: <https://doi.org/10.5772/3391>.
29. Ostashevskiy N.A., Petrenko A.N., Yurieva O.Yu. *Teplovi rozrakhunky elektrychnykh mashyn* [Thermal calculations of electric machines]. Kharkiv, O.M. Beketov NUUEKh Publ., 2020. 450 p. (Ukr).
30. *The Engineering Toolbox*. Available at: <https://www.engineeringtoolbox.com> (Accessed 20.02.2022).
31. *Materials Thermal Properties Database*. Available at: <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database> (Accessed 20.02.2022).
32. Duong M.T., Chun Y.-D., Park B.-G., Kim D.-J., Choi J.-H., Han P.-W. Thermal analysis of a high speed induction motor considering harmonic loss distribution. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, vol. 12, pp. 1503-1510. doi: <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.4.1503>.
33. Shams Ghahfarokhi P., Podgornovs A., Kallaste A., Cardoso A.J.M., Belahcen A., Vaimann T., Asad B., Tiismus H. Determination of Heat Transfer Coefficient from Housing Surface of a Totally Enclosed Fan-Cooled Machine during Passive Cooling. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 6, art. no. 120. doi: <https://doi.org/10.3390/machines9060120>.
34. *SMATH Studio*. Available at: <https://smath.com> (Accessed 20.02.2022).

Received 11.08.2022

Accepted 25.10.2022

Published 06.05.2023

V.I. Milykh<sup>1</sup>, Doctor of Technical Science, Professor;

V.P. Shaïda<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor;

O.Yu. Yurieva<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor;

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»;

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine,

e-mail: mvikemkpi@gmail.com (Corresponding Author),

vpsh1520@gmail.com; ele6780@gmail.com

### How to cite this article:

Milykh V.I., Shaïda V.P., Yurieva O.Yu. Analysis of the thermal state of the electromagnetic mill inductor with oil cooling in stationary operation modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 12-20. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.02>

S. Sakhara, M. Brahimi, L. Nacib, T.M. Layadi

## Application of a wavelet neural network approach to detect stator winding short circuits in asynchronous machines

**Introduction.** Nowadays, fault diagnosis of induction machines plays an important role in industrial fields. In this paper, Artificial Neural Network (ANN) model has been proposed for automatic fault diagnosis of an induction machine. The aim of this research study is to design a neural network model that allows generating a large database. This database can cover maximum possible of the stator faults. The fault considered in this study take into account a short circuit with large variations in the machine load. Moreover, the objective is to automate the diagnosis algorithm by using ANN classifier. **Method.** The database used for the ANN is based on indicators which are obtained from wavelet analysis of the machine stator current of one phase. The developed neural model allows to taking in consideration imbalances which are generated by short circuits in the machine stator. The implemented mathematical model in the expert system is based on a three-phase model. The mathematical parameters considered in this model are calculated online. The characteristic vector of the ANN model is formed by decomposition of stator current signal using wavelet discrete technique. **Obtained results** show that this technique allows to ensure more detection with clear evaluation of turn number in short circuit. Also, the developed expert system for the taken configurations is characterized by high precision. References 18, tables 5, figures 4.

**Key words:** discrete wavelet transform, induction machine, three-phase model, multilayer perceptron neural network.

**Вступ.** Нині діагностика несправностей асинхронних машин відіграє значну роль у промисловості. У цій статті запропоновано модель штучної нейронної мережі для автоматичної діагностики несправностей асинхронної машини. **Метою** цього дослідження є розробка моделі нейронної мережі, що дозволяє генерувати велику базу даних. Ця база може охоплювати максимально можливі несправності статора. Несправності, розглянуті у цьому дослідженні, враховують коротке замикання при великих коливаннях навантаження машини. Крім того, мета полягає в тому, щоб автоматизувати алгоритм діагностики за допомогою класифікатора штучної нейронної мережі. **Метод.** База даних, що використовується для штучної нейронної мережі, заснована на показниках, отриманих в результаті вейвлет-аналізу струму статора машини однієї фази. Розроблена нейронна модель дозволяє враховувати дисбаланси, що виникають при коротких замиканнях у статорі машини. Реалізована математична модель в експертній системі ґрунтується на трифазній моделі. Математичні параметри, що враховуються в цій моделі, розраховуються онлайн. Характеристичний вектор моделі штучної нейронної мережі формується шляхом розкладання сигналу струму статора з використанням вейвлет-дискретного методу. **Отримані результати** показують, що дана методика дозволяє забезпечити більше виявлення з чіткою оцінкою числа витків при короткому замиканні. Також розроблена експертна система для конфігурацій, що приймаються, відрізняється високою точністю. Бібл. 18, табл. 5, рис. 4.

**Ключові слова:** дискретне вейвлет-перетворення, асинхронна машина, трифазна модель, багатощарова перцептронна нейронна мережа.

### REFERENCES

1. Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng. A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System With Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 881-886. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.895461>.
2. Sakhara S., Saad S., Nacib L. Diagnosis and detection of short circuit in asynchronous motor using three-phase model. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 308-317. doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-016-0435-1>.
3. Bessam B., Menacer A., Boumehraz M., Cherif H. Wavelet transform and neural network techniques for inter-turn short circuit diagnosis and location in induction motor. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2017, vol. 8, no. S1, pp. 478-488. doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-015-0400-4>.
4. Nacib L., Saad S., Sakhara S. A Comparative Study of Various Methods of Gear Faults Diagnosis. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2014, vol. 14, no. 5, pp. 645-656. doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9860-0>.
5. Talhaoui H., Menacer A., Kessal A., Kechida R. Fast Fourier and discrete wavelet transforms applied to sensorless vector control induction motor for rotor bar faults diagnosis. *ISA Transactions*, 2014, vol. 53, no. 5, pp. 1639-1649. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.06.003>.
6. Cherif H., Benakcha A., Khechekhouche A., Menacer A., Chehaidia S.E., Panchal H. Experimental diagnosis of inter-turns stator fault and unbalanced voltage supply in induction motor using MCSA and DWER. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 1202-1216. doi: <https://doi.org/10.21533/pen.v8i3.1058.g607>.
7. Xianrong Chang, Cocquemot V., Christophe C. A model of asynchronous machines for stator fault detection and isolation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, vol. 50, no. 3, pp. 578-584. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.812471>.
8. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, 1993, pp. 316-323. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.1993.298942>.
9. Schoen R.R., Lin B.K., Habetler T.G., Schlag J.H., Farag S. An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, vol. 31, no. 6, pp. 1280-1286. doi: <https://doi.org/10.1109/28.475698>.
10. Said M.S.N., Benbouzid M.E.H., Benchaib A. Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 66-70. doi: <https://doi.org/10.1109/60.849118>.
11. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of distribution laws of transformer oil indicators in 110-330 kV transformers. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 5, pp. 46-56. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.5.07>.
12. Paranchuk Y.S., Shabaturova Y.V., Kuznyetsov O.O. Electromechanical guidance system based on a fuzzy proportional-plus-differential position controller. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 25-31. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.04>.
13. Belbachir N., Zellagui M., Settoul S., El-Bayeh C.Z., Bekkouche B. Simultaneous optimal integration of photovoltaic distributed generation and battery energy storage system in active distribution network using chaotic grey wolf optimization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 52-61. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.09>.

## Abstract and References

---

14. Bengharbi A.A., Laribi S., Allaoui T., Mimouni A. Photovoltaic system faults diagnosis using discrete wavelet transform based artificial neural networks. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 42-47. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.07>.

15. Abid M., Laribi S., Larbi M., Allaoui T. Diagnosis and localization of fault for a neutral point clamped inverter in wind energy conversion system using artificial neural network technique. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 55-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.09>.

16. Bouchaoui L., Hemsas K.E., Mellah H., Benlahneche S. Power transformer faults diagnosis using undestructive methods (Roger and IEC) and artificial neural network for dissolved gas analysis applied on the functional transformer in the Algerian north-eastern: a comparative study. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 4, pp. 3-11. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.01>.

17. Bessous N., Zouzou S.E., Bentrach W., Sbaa S., Sahraoui M. Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 335-343. doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-016-0459-6>.

18. Kechida R., Menacer A., Talhaoui H. Approach Signal for Rotor Fault Detection in Induction Motors. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 346-352. doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-013-9681-6>.

### How to cite this article:

Sakhara S., Brahimi M., Nacib L., Layadi T.M. Application of a wavelet neural network approach to detect stator winding short circuits in asynchronous machines. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.03>

Received 14.10.2022

Accepted 25.12.2022

Published 06.05.2023

Saadi Sakhara<sup>1,2</sup>, PhD, Associate Professor,

Mohamed Brahimi<sup>3</sup>, PhD, Associate Professor,

Leila Nacib<sup>1,2</sup>, PhD, Associate Professor,

Toufik Madani Layadi<sup>4</sup>, PhD, Associate Professor,

<sup>1</sup>Laboratory of Physics of Materials, Radiation and Nanostructures,

University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou

Arreridj, Algeria.

<sup>2</sup>Department of Electromechanical Engineering,

University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou

Arreridj, Algeria,

e-mail: saadi.sekhara@univ-bba.dz (Corresponding Author);

leila.nacib@univ-bba.dz

<sup>3</sup>Physical Chemistry and Biology of Materials Laboratory,

National Higher School of Artificial Intelligence, Algeria,

e-mail: mohamed.brahimi@ensia.edu.dz

<sup>4</sup>Laboratory of Materials and Electronic Systems,

Department of Electromechanical Engineering,

University Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou

Arreridj, Algeria,

e-mail: toufikmadani.layadi@univ-bba.dz

A. Aib, D.E. Khodja, S. Chakroune

## Field programmable gate array hardware in the loop validation of fuzzy direct torque control for induction machine drive

**Introduction.** Currently, the direct torque control is very popular in industry and is of great interest to scientists in the variable speed drive of asynchronous machines. This technique provides decoupling between torque control and flux without the need to use pulse width modulation or coordinate transformation. Nevertheless, this command presents two major importunities: the switching frequency is highly variable on the one hand, and on the other hand, the amplitude of the torque and stator flux ripples remain poorly controlled throughout the considered operating speed range. The **novelty** of this article proposes improvements in performance of direct torque control of asynchronous machines by development of a fuzzy direct torque control algorithm. This latter makes it possible to provide solutions to the major problems of this control technique, namely: torque ripples, flux ripples, and failure to control switching frequency. **Purpose.** The emergence of this method has given rise to various works whose objective is to show its performance, or to provide solutions to its limitations. Indeed, this work consists in validation of a fuzzy direct torque control architecture implemented on the ML402 development kit (based on the Xilinx Virtex-4 type field programmable gate array circuit), through hardware description language (VHDL) and Xilinx generator system. The obtained **results** showed the robustness of the control and sensorless in front of load and parameters variation of induction motor control. The research directions of the model were determined for the subsequent implementation of results with simulation samples. References 19, tables 5, figures 26.

**Key words:** fuzzy control, field programmable gate array, Xilinx system generator, direct torque control, power system.

**Вступ.** В даний час пряме управління моментом дуже популярне в промисловості і викликає великий інтерес у вчених у галузі частотно-регульованого приводу асинхронних машин. Цей метод забезпечує розв'язку між керуванням моментом, що крутить, і магнітним потоком без необхідності використання широтно-імпульсної модуляції або перетворення координат. Тим не менш, ця команда представляє дві основні незручності: з одного боку, частота комутації сильно варіюється, а з іншого боку, амплітуда пульсацій моменту і потоку статора залишається погано контрольованою у всьому діапазоні робочих швидкостей. **Новизна** цієї статті пропонує поліпшення характеристик прямого керування моментом, що крутить, асинхронних машин шляхом розробки нечіткого алгоритму прямого управління моментом, що крутить. Останнє дозволяє вирішити основні проблеми цього методу управління, а саме: пульсації моменту, що крутить, пульсації потоку і нездатність контролювати частоту перемикання. **Мета.** Поява цього методу породило різні роботи, метою яких є показати його ефективність чи запропонувати рішення стосовно його обмежень. Дійсно, ця робота полягає у перевірці нечіткої архітектури прямого управління моментом, що крутить, реалізованої в наборі для розробки ML402 (на основі схеми Xilinx Virtex-4 з програмованою користувачем вентильною матрицею), за допомогою мови опису обладнання (VHDL) та генераторної системи Xilinx. **Отримані результати** показали робастність керування та безсенсорного керування при зміні навантаження та параметрів керування асинхронним двигуном. Визначено напрями дослідження моделі для подальшої реалізації результатів на імітаційних вибірках. Бібл. 19, табл. 5, рис. 26.

**Ключові слова:** нечітке управління, програмована користувачем вентильна матриця, генераторна система Xilinx, пряме управління моментом, що крутить, система живлення.

### REFERENCES

1. Takahashi I., Ohmori Y. High-performance direct torque control of an induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 257-264. doi: <https://doi.org/10.1109/28.25540>.
2. Moussaoui L. Performance enhancement of direct torque control induction motor drive using space vector modulation strategy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 1, pp. 29-37. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.04>.
3. Gdaim S., Mtibaa A., Mimouni M.F. Direct Torque Control of Induction Machine based on Intelligent Techniques. *International Journal of Computer Applications*, 2010, vol. 10, no. 8, pp. 29-35. doi: <https://doi.org/10.5120/1500-2017>.
4. Malyar V.S., Hamola O.Y., Maday V.S., Vasylyshyn I.I. Mathematical modelling of starting modes of induction motors with squirrel-cage rotor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 9-15. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.02>.
5. Djamilia C., Yahia M. Direct Torque Control Strategies of Induction Machine: Comparative Studies. In *Direct Torque Control Strategies of Electrical Machines*. IntechOpen. 2021. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.90199>.
6. Gdaim S., Mtibaa A., Mimouni M.F. Design and Experimental Implementation of DTC of an Induction Machine Based on Fuzzy Logic Control on FPGA. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2015, vol. 23, no. 3, pp. 644-655. doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2014.2321612>.
7. Eddine Khodja D., Simard S., Beguenan R. Implementation of optimized approximate sigmoid function on FPGA circuit to use in ANN for control and monitoring. *Control Engineering and Applied Informatics*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 64-72.
8. Da Costa C., Santin C.O. FPGA design approach of digital control of three-phase induction motor. *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2017, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257221>.
9. Monmasson E., Cirstea M.N. FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems – A Review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 1824-1842. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.898281>.
10. Toh C.L., Idris N.R.N., Yatim A.H.M., Muhamad N.D., Elbuluk M. Implementation of a New Torque and Flux Controllers for Direct Torque Control (DTC) of Induction Machine Utilizing Digital Signal Processor (DSP) and Field Programmable Gate Arrays (FPGA). *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists*, 2005, pp. 1594-1599. doi: <https://doi.org/10.1109/PESC.2005.1581843>.
11. Lis J., Kowalski C.T., Orłowska-Kowalska T. Sensorless DTC control of the induction motor using FPGA. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 1914-1919. doi: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2008.4677287>.
12. Sutikno T., Idris N.R.N., Jidin A.Z., Daud M.Z. FPGA based high precision torque and flux estimator of direct torque control drives. *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011, pp. 122-127. doi: <https://doi.org/10.1109/IAPEC.2011.5779871>.
13. Monmasson E., Idkhajine L., Cirstea M.N., Bahri I., Tisan A., Naouar M.W. FPGAs in Industrial Control Applications.

## Abstract and References

*IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, vol. 7, no. 2, pp. 224-243. doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2123908>.

14. Aib A. FPGA Hardware in the Loop Validation of Torque and Flux Estimators for Direct Torque Control (DTC) of an Induction Motor (IM). *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2021, vol. 14, no. 5, pp. 583-594. doi: <https://doi.org/10.22266/ijies2021.1031.51>.

15. Boukadida S., Gdaim S., Mtibaa A. Hardware Implementation of FTC of Induction Machine on FPGA. *Electronics ETF*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 76-84. doi: <https://doi.org/10.7251/ELS1620076B>.

16. Zare M.A., Kavasseri R.G., Ababei C. FPGA-based design and implementation of direct torque control for induction machines. *2014 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig14)*, 2014, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ReConFig.2014.7032520>.

17. Lee G.S., Lee D.H., Yoon T.W., Lee K.B., Song J.H., Choy I. Speed and flux estimation for an induction motor using a parameter estimation technique. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2005, vol. 3, no. 1, pp. 79-86.

18. Sandre-Hernandez O., Rangel-Magdaleno J., Morales-Caporal R., Bonilla-Huerta E. HIL simulation of the DTC for a three-level inverter fed a PMSM with neutral-point balancing control based on FPGA. *Electrical Engineering*, 2018, vol. 100, no. 3, pp. 1441-1454. doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0597-0>.

### How to cite this article:

Aib A., Khodja D.E., Chakroune S. Field programmable gate array hardware in the loop validation of fuzzy direct torque control for induction machine drive. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 28-35. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.04>

19. Lotfi E., Elharoussi M., Abdelmounim E. VHDL design and FPGA implementation of direct torque control for induction machines. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 1220-1231. doi: <https://doi.org/10.11591/eei.v10i3.2345>.

Received 25.07.2022

Accepted 15.11.2022

Published 06.05.2023

Abdelghani Aib<sup>1</sup>, Doctor of Electrotechnical,  
Djalal Eddine Khodja<sup>2</sup>, Doctor of Electrotechnical, Professor,  
Salim Chakroune<sup>1</sup>, Doctor of Electrotechnical, Professor,

<sup>1</sup> Research Laboratory on the Electrical Engineering,  
Faculty of Technology,

University of M'Sila, BP 166, Ichbilia 28000, Algeria,

e-mail: abdelghani.aib@univ-msila.dz,

salim.chakroun@univ-msila.dz (Corresponding Author).

<sup>2</sup> Signals & Systems Lab,

Institute of Electrical and Electronic Engineering,

Boumerdes, 35000, Algeria,

e-mail: djalaleddine.khodja@univ-msila.dz



J. Fan, Y. Lee

**Sensorless control of switched reluctance motor based on a simple flux linkage model**

**Introduction.** The operation of switched reluctance motor requires prior knowledge of the rotor position, obtaining from either low resolution photocoupler based position sensor or high resolution shaft encoder, to control the on/off states of the power switches.

**Problem.** However, using physical position sensor in harsh environment will inevitably reduce the reliability of the motor drive, in which sensorless control comes into play. **Novelty.** In this paper, a sensorless control scheme of switched reluctance motor is proposed. **Methodology.** The method is based on a simple analytical model of the flux-linkage curves rather than the conventional approach that normally uses a look-up table to store all the data points of the flux-linkage curves. By measuring the phase current, rotor position can be deduced from the analytical model. **Practical value.** Simulation results are given and the proposed sensorless scheme is verified to provide a moderate position estimation accuracy in a wide speed range in both unsaturated and saturated conditions. References 9, figures 6.

**Key words:** analytical model, switched reluctance motor, sensorless control.

**Вступ.** Для роботи вентильного реактивного двигуна потрібне попереднє знання положення ротора, отримане або від датчика положення на основі оптичарі з низькою роздільною здатністю, або від енкодера з високою роздільною здатністю, щоб керувати станами вмикання/вимикання силових перемикачів. **Проблема.** Однак використання датчика фізичного положення в суворих умовах неминуче знижує надійність моторного приводу, в якому набуває чинності бездатчикове управління. **Новизна.** У цій роботі пропонується бездатчикова схема управління вентильним реактивним двигуном. **Методологія.** Цей метод заснований на простій аналітичній моделі кривих потокозчеплення, а не на традиційному підході, який зазвичай використовує довідкову таблицю для зберігання всіх точок даних кривих потокозчеплення. Вимірявши фазний струм, положення ротора можна вивести з аналітичної моделі. **Практична цінність.** Наведено результати моделювання та перевірено запропоновану бездатчикову схему для забезпечення помірної точності оцінки положення в широкому діапазоні швидкостей як у ненасичених, так і в насичених умовах. Бібл. 9, рис. 6.

**Ключові слова:** аналітична модель, вентильний реактивний двигун, бездатчикове керування.

## REFERENCES

- Xue X.D., Cheng K.W.E., Bao Y.J. Control and Integrated Half Bridge to Winding Circuit Development for Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, vol. 10, no. 1, pp. 109-116. doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2251890>.
- Bostanci E., Moallem M., Parsapour A., Fahimi B. Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 58-75. doi: <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2649883>.
- Cai J., Deng Z. Switched-Reluctance Position Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2329957>.
- Tang Y., He Y., Wang F., Lee D., Ahn J., Kennel R. Back-EMF-based sensorless control system of hybrid SRM for high-speed operation. *IET Electric Power Applications*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 867-873. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0641>.
- Ehsani M., Fahimi B. Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives: state of the art and future trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, no. 1, pp. 40-47. doi: <https://doi.org/10.1109/41.982246>.
- Suresh G., Fahimi B., Rahman K.M., Ehsani M. Inductance based position encoding for sensorless SRM drives. *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No.99CH36321)*, 1999, vol. 2, pp. 832-837. doi: <https://doi.org/10.1109/PESC.1999.785607>.
- Kaewpoo N., Ohya K., Nakazawa Y., Fujii H., Uehara H., Hyakutake Y. Simulation of SRM Sensorless Control System for Electric Vehicle. *2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, 2018, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEAST.2018.8434508>.
- Gallegos-Lopez G., Kjaer P.C., Miller T.J.E. A new sensorless method for switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 832-840. doi: <https://doi.org/10.1109/28.703987>.
- Le-Huy H., Brunelle P. A versatile nonlinear switched reluctance motor model in Simulink using realistic and analytical magnetization characteristics. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2005. IECON 2005, Raleigh, NC, USA, 2005, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2005.1569136>.

Received 10.08.2022

Accepted 30.11.2022

Published 06.05.2023

Jiayi Fan<sup>1</sup>, Master's Degree,  
Yongkeun Lee<sup>1</sup>, PhD, Professor,  
<sup>1</sup> Seoul National University of Science and Technology,  
Seoul 01811, South Korea,  
e-mail: fgy1510780466@163.com,  
ykleee@seoultech.ac.kr (Corresponding Author)

**How to cite this article:**

Fan J., Lee Y. Sensorless control of switched reluctance motor based on a simple flux linkage model. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 36-39. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.05>

A. Boukadoum, A. Bouguerne, T. Bahi

## Direct power control using space vector modulation strategy control for wind energy conversion system using three-phase matrix converter

**Introduction.** Wind energy conversion system is getting a lot of attention since they provide several advantages, such as cost competitive, environmentally clean, and safe renewable power source as compared with the fossil fuel and nuclear power generation. A special type of induction generator, called a doubly fed induction generator is used extensively for high-power wind energy conversion system. They are used more and more in wind turbine applications due to the advantages of variable speed operation range and its four quadrants active and reactive power capabilities, high energy efficiency, and the improved power quality. Wind energy conversion systems require a good choice of power electronic converters for the improvement of the quality of the electrical energy produced at the generator terminals. There are several power electronics converters that are the most popular such as the two stage back-back converter. Because of the disadvantage of these converters to produce large harmonics distortions, we will choose using of three-phase matrix converter. **Purpose.** Work presents a direct power control using space vector modulation for a doubly fed induction generator based wind turbine. The main strategy control is to control the active and reactive powers and reduce the harmonic distortion of stator currents for variable wind speed. The **novelty** of the work is to use a doubly fed induction machine and a three pulses matrix converter to reduce the low cost, volume and the elimination of the grid side converter controller are very attractive aspects of the proposed topology compared to the conventional methods such as back-to-back converters. **Simulation results** are carried out on a 1.5 MW of wind energy conversion system connected to the grid. The efficiency of the proposed system has been simulated and high results performances are evaluated to show the validity of the proposed control strategy to decouple and control the active and reactive power for different values of wind speed. References 32, tables 2, figures 15. **Key words:** doubly fed induction generator, matrix converter, wind turbine, direct power control using space vector modulation strategy control, power quality.

**Вступ.** Системам перетворення енергії вітру приділяється велика увага, оскільки вони забезпечують низку переваг, таких як конкурентоспроможність за вартістю, екологічно чисте та безпечне відновлюване джерело енергії порівняно з викопним паливом та виробництвом ядерної енергії. Спеціальний тип асинхронного генератора, що називається асинхронним генератором з подвійним живленням, широко використовується в системах перетворення енергії вітру великої потужності. Вони все більше і більше використовуються у вітряних турбінах через переваги діапазону роботи зі змінною швидкістю та його чотириквadrантних можливостей активної та реактивної потужності, високої енергоефективності та покращеної якості електроенергії. Системи перетворення енергії вітру вимагають хорошого вибору силових електронних перетворювачів для покращення якості електроенергії, що виробляється на клеммах генератора. Існує кілька перетворювачів силової електроніки, які є найбільш популярними, наприклад двокаскадний зворотньо-зворотний перетворювач. Через те, що ці перетворювачі не створюють великих гармонічних спотворень, ми виберемо використання трифазного матричного перетворювача. **Мета.** У роботі представлено пряме керування потужністю з використанням модуляції просторового вектора для вітрової турбіни на основі асинхронного генератора з подвійним живленням. Основною стратегією управління є управління активною та реактивною потужністю та зниження гармонійних спотворень струмів статора при змінній швидкості вітру. **Новизна** роботи полягає у використанні асинхронної машини з подвійним живленням і тримпульсного матричного перетворювача для зниження вартості, об'єму та усунення контролера перетворювача з боку мережі, що є дуже привабливими аспектами запропонованої топології у порівнянні зі звичайними методами, такими як зустрічно-зворотні перетворювачі. **Результати** моделювання отримані на системі перетворення енергії вітру потужністю 1,5 МВт, підключеної до мережі. Ефективність запропонованої системи була змодельована, а високі результати оцінені, щоб показати обрнунтованість запропонованої стратегії управління для поділу та управління активною та реактивною потужністю для різних значень швидкості вітру. Бібл. 32, табл. 2, рис. 15. **Ключові слова:** асинхронний генератор з подвійним живленням, матричний перетворювач, вітряна турбіна, пряме керування потужністю з використанням стратегії просторово-векторної модуляції, якість електроенергії.

### REFERENCES

1. Bistline J., Abhyankar N., Blanford G., Clarke L., Fakhry R., McJeon H., Reilly J., Roney C., Wilson T., Yuan M., Zhao A. Actions for reducing US emissions at least 50% by 2030. *Science*, 2022, vol. 376, no. 6596, pp. 922-924. doi: <https://doi.org/10.1126/science.abn0661>.
2. Williams J.H., DeBenedictis A., Ghanadan R., Mahone A., Moore J., Morrow W.R., Price S., Torn M.S. The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050: The Pivotal Role of Electricity. *Science*, 2012, vol. 335, no. 6064, pp. 53-59. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1208365>.
3. Pfenninger S., Keirstead J. Comparing concentrating solar and nuclear power as baseload providers using the example of South Africa. *Energy*, 2015, vol. 87, pp. 303-314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.077>.
4. Boopathi K., Ramaswamy S., Kirubakaran V., Uma K., Saravanan G., Thyagaraj S., Balaraman K. Economic investigation of repowering of the existing wind farms with hybrid wind and solar power plants: a case study. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 855-871. doi: <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00391-3>.
5. Staffell I., Pfenninger S. The increasing impact of weather on electricity supply and demand. *Energy*, 2018, vol. 145, pp. 65-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.051>.
6. Sureshkumar K., Ponnusamy V. Hybrid renewable energy systems for power flow management in smart grid using an efficient hybrid technique. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2020, vol. 42, no. 11, pp. 2068-2087. doi: <https://doi.org/10.1177/0142331220904818>.
7. Boumassata A., Kerdoun D., Oualah O. Maximum power control of a wind generator with an energy storage system to fix the delivered power. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 2, pp. 41-46. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.2.07>.
8. Boutoubat M., Mokrani L., Machmoum M. Control of a wind energy conversion system equipped by a DFIG for active power generation and power quality improvement. *Renewable Energy*, 2013, vol. 50, pp. 378-386. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.058>.
9. Tang C.Y., Guo Y., Jiang J.N. Nonlinear Dual-Mode Control of Variable-Speed Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, vol. 19, no. 4, pp. 744-756. doi: <https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2053931>.

10. El-Sattar A.A., Saad N.H., El-Dein M.Z.S. Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault. *Electric Power Systems Research*, 2008, vol. 78, no. 7, pp. 1240-1246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2007.10.005>.
11. Kahla S., Bechouat M., Amieur T., Sedraoui M., Babes B., Hamouda N. Maximum power extraction framework using robust fractional-order feedback linearization control and GM-CPSO for PMSG-based WECS. *Wind Engineering*, 2021, vol. 45, no. 4, pp. 1040-1054. doi: <https://doi.org/10.1177/0309524X20948263>.
12. Sahri Y., Tamalouzt S., Hamoudi F., Belaid S.L., Bajaj M., Alharthi M.M., Alzaidi M.S., Ghoneim S.S.M. New intelligent direct power control of DFIG-based wind conversion system by using machine learning under variations of all operating and compensation modes. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 6394-6412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.075>.
13. Mazouz F., Belkacem S., Colak I., Drid S., Harbouche Y. Adaptive direct power control for double fed induction generator used in wind turbine. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 114, art. no. 105395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105395>.
14. Zhi D., Xu L. Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 110-118. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889549>.
15. Babes B., Hamouda N., Kahla S., Amar H., Ghoneim S.S.M. Fuzzy model based multivariable predictive control design for rapid and efficient speed-sensorless maximum power extraction of renewable wind generators. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 51-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.08>.
16. Wheeler P.W., Rodriguez J., Clare J.C., Empringham L., Weinstein A. Matrix converters: a technology review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, no. 2, pp. 276-288. doi: <https://doi.org/10.1109/41.993260>.
17. Kolar J.W., Friedli T., Rodriguez J., Wheeler P.W. Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 11, pp. 4988-5006. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2159353>.
18. Casadei D., Serra G., Tani A., Zarri L. Optimal Use of Zero Vectors for Minimizing the Output Current Distortion in Matrix Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 2, pp. 326-336. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007557>.
19. Varajão D., Araújo R.E. Modulation Methods for Direct and Indirect Matrix Converters: A Review. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 7, art. no. 812. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10070812>.
20. Sayed M.A., Suzuki K., Takeshita T., Kitagawa W. PWM Switching Technique for Three-Phase Bidirectional Grid-Tie DC-AC-AC Converter With High-Frequency Isolation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 845-858. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2668441>.
21. Shi T., Wu L., Yan Y., Xia C. Harmonic Spectrum of Output Voltage for Space Vector Pulse Width Modulated Ultra Sparse Matrix Converter. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 2, art. no. 390. doi: <https://doi.org/10.3390/en11020390>.
22. Tuyen N., Dzung P. Space Vector Modulation for an Indirect Matrix Converter with Improved Input Power Factor. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 5, art. no. 588. doi: <https://doi.org/10.3390/en10050588>.
23. Rodriguez J., Rivera M., Kolar J.W., Wheeler P.W. A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 1, pp. 58-70. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2165310>.
24. Wang X., Lin H., She H., Feng B. A Research on Space Vector Modulation Strategy for Matrix Converter Under Abnormal Input-Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 1, pp. 93-104. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2157288>.
25. Huber L., Borojevic D. Space vector modulation with unity input power factor for forced commutated cycloconverters. *Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1991, pp. 1032-1041. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.1991.178363>.
26. Li D., Deng X., Li C., Zhang X., Fang E. Study on the space vector modulation strategy of matrix converter under abnormal input condition. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, vol. 61, no. 6, pp. 4595-4605. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.020>.
27. Sellah M., Kouzou A., Mohamed-Seghir M., Rezaoui M.M., Kennel R., Abdelrahem M. Improved DTC-SVM Based on Input-Output Feedback Linearization Technique Applied on DOEWM Powered by Two Dual Indirect Matrix Converters. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18, art. no. 5625. doi: <https://doi.org/10.3390/en14185625>.
28. Sahri Y., Tamalouzt S., Hamoudi F., Belaid S.L., Bajaj M., Alharthi M.M., Alzaidi M.S., Ghoneim S.S.M. New intelligent direct power control of DFIG-based wind conversion system by using machine learning under variations of all operating and compensation modes. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 6394-6412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.075>.
29. Sun D., Wang X., Nian H., Zhu Z.Q. A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 2, pp. 1313-1322. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2686980>.
30. Chaudhuri A., Datta R., Kumar M.P., Davim J.P., Pramanik S. Energy Conversion Strategies for Wind Energy System: Electrical, Mechanical and Material Aspects. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 3, art. no. 1232. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15031232>.
31. Benbouhenni H., Lemdani S. Combining synergetic control and super twisting algorithm to reduce the active power undulations of doubly fed induction generator for dual-rotor wind turbine system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 8-17. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.02>.
32. Benbouhenni H., Boudjema Z., Belaidi A. DPC Based on ANFIS Super-Twisting Sliding Mode Algorithm of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy System. *Journal Européen Des Systèmes Automatisés*, 2020, vol. 53, no. 1, pp. 69-80. doi: <https://doi.org/10.18280/jesa.530109>.

Received 22.08.2022

Accepted 10.11.2022

Published 06.05.2023

Aziz Boukadoum<sup>1</sup>, Associate Professor,  
Abla Bouguerne<sup>1</sup>, Associate Professor,  
Tahar Bahi<sup>2</sup>, Professor,

<sup>1</sup> Labget laboratory, Department of Electrical Engineering,  
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa, Algeria,  
e-mail: azizboukadoum@yahoo.fr (Corresponding Author),  
bouguerneabla@yahoo.fr

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering,  
University Badji Mokhtar Annaba, Algeria,  
e-mail: tbahi@hotmail.fr

### How to cite this article:

Boukadoum A., Bouguerne A., Bahi T. Direct power control using space vector modulation strategy control for wind energy conversion system using three-phase matrix converter. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 40-46. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.06>

V.G. Yagup, K.V. Yagup

**Acceleration of exit to steady-state mode when modeling semiconductor converters**

The **purpose** of the article is to develop a method and algorithm for the accelerated calculation of steady states of thyristor converters using computer models of converters based on the use of the theory of difference equations in the form of recurrent linear relationships for state variables on the boundaries of the converter periods. **Methodology.** The article is devoted to the solution of the problem of reducing the cost of computer time to achieve the steady state of the thyristor converter. For this, it is proposed to use difference equations, for which the values of the state variables at the limits of the periods of the converter's operation are taken as variables. These values are accumulated during the initial periods of the transient process of the converter, after which the coefficients of the difference equations are calculated, and the following limit values of the state variables are found using the defined difference equations. A program in the algorithmic language of the MATLAB system is presented, which implements the proposed method and algorithm compatible with the visual model of the converter. **Results.** The theoretical foundations of the proposed method and the area of its applicability are substantiated. Recommendations are presented for determining the number of periods of the flow process that must be calculated for further implementation of the method. An algorithm for forming matrix relations for determining the coefficients of difference equations with respect to the values of state variables at the boundaries of periods is shown. Matrix equations are given that allow calculating the parameters of the steady state. All stages of the algorithm are illustrated with numerical examples. **Originality.** The method rationally combines all the advantages of visual modeling based on the numerical integration of equations using the method of state variables for the periods of operation of the converter with the analytical solution of the recurrence relations obtained on this basis for the values of state variables at the boundaries of adjacent periods. **Practical value.** The proposed method makes it possible to reduce by several orders of magnitude the computer time spent on calculating the parameters of the steady-state mode of the converter and, at the same time, to significantly improve the accuracy of these calculations. The practical application of the method is very effective in research and design of thyristor converters of electrical energy parameters. References 10, tables 2, figures 4.

**Key words:** thyristor converter, state variables, difference equations, steady state, visual model.

Стаття присвячена вирішенню проблеми зменшення витрат комп'ютерного часу для досягнення усталеного режиму тиристорного перетворювача. Для цього запропоновано використати різницеві рівняння, для яких в якості змінних приймаються значення змінних стану на межах періодів роботи перетворювача. Ці значення накопичуються на початкових періодах перехідного процесу перетворювача, після чого вираховуються коефіцієнти різницевого рівняння, і наступні межові значення змінних стану знаходяться з використанням визначених різницевого рівняння. Представлена програма на алгоритмічній мові системи MATLAB, яка реалізує запропоновані метод і алгоритм сумісно з візуальною моделлю перетворювача. Бібл. 10, табл. 2, рис. 4.

**Ключові слова:** тиристорний перетворювач, змінні стану, різницеві рівняння, усталений режим, візуальна модель.

## REFERENCES

1. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. 823 p.
2. Yagup V.G. *Automated calculation of thyristor circuits*. Kharkov, Vyshcha School Publishing House at KSU, 1986. 160 p. (Rus).
3. Rajagopalan V. *Computer-Aided Analysis of Power Electronic Systems*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1987. 552 p.
4. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. *Numerical Methods*. Moscow, BINOM Publ., 2008. 636 p. (Rus).
5. Aprille T., Trick T. A computer algorithm to determine the steady-state response of nonlinear oscillators. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1972, vol. 19, no. 4, pp. 354-360. doi: <https://doi.org/10.1109/TCT.1972.1083500>.
6. Aprille T.J., Trick T.N. Steady-state analysis of nonlinear circuits with periodic inputs. *Proceedings of the IEEE*, 1972, vol. 60, no. 1, pp. 108-114. doi: <https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8563>.
7. Moskovko A., Vityaz O. Periodic steady-state analysis of relaxation oscillators using discrete singular convolution method. *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2017, pp. 506-510. doi: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2017.7939803>.
8. Verbiczkiy E.V., Romashko V.Y. Application of Difference Equations in Predictive Control Systems for DC-DC Converters. *Electronics and Communications*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 23-27. doi: <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2012.17.2.220024>.
9. Mikhalchenko G.Ya., Mulikov D.S. Operation modes of frequency converter with active rectifier. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 2, p. 79-83. (Rus).
10. Cheng X., Chen Y., Chen X., Zhang B., Qiu D. An extended analytical approach for obtaining the steady-state periodic solutions of SPWM single-phase inverters. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, pp. 1311-1316. doi: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8095941>.

Received 30.08.2022

Accepted 30.11.2022

Published 06.05.2023

V.G. Yagup<sup>1</sup>, Doctor of Technical Science, Professor,  
K.V. Yagup<sup>2</sup>, Doctor of Technical Science, Professor,  
<sup>1</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University,  
25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine,  
e-mail: yagup.walery@gmail.com (Corresponding Author)  
<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

How to cite this article:

Yagup V.G., Yagup K.V. Acceleration of exit to steady-state mode when modeling semiconductor converters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.07>

V.O. Brzhezitskyi, Y.O. Haran, Y.O. Trotsenko, O.R. Protsenko, A.O. Derzhuk, M.M. Dixit

## Ultimate effect of non-identity of resistive elements of high-voltage arm on frequency characteristics of broadband voltage divider (analytical research)

**Purpose.** Determination in the analytical form of the maximum limiting influence of the non-identity of the resistive elements of the high-voltage arm on the amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of the voltage divider with parallel-series connection of R-, C-elements of the high-voltage arm. **Methodology.** Based on the previously developed theory of broadband voltage dividers with parallel-series connection of R-, C-elements, analytical expressions for amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the voltage divider are obtained and investigated taking into account the limit case of non-identical resistive elements of high-voltage arm. **Results.** The nature of the dependencies of the frequency characteristics of the broadband voltage divider on the value of the tolerance of the resistive elements of the high-voltage arm, the division factor of the voltage divider in a wide range of frequency changes are determined. Simplified approximating expressions for the maximum values of frequency characteristics of the voltage divider are proposed and their error is determined. **Originality.** For the first time in the analytical form the limiting influence of non-identity of resistive elements of a high-voltage arm of a voltage divider on its frequency characteristics is considered. A mathematical model of this influence is constructed and the limit values of frequency characteristics of the voltage divider are determined. **Practical value.** It is recommended to introduce into the normative documentation of broadband voltage dividers the corrected value of the division factor, which allows to significantly reduce the deviation of the actual value of the division factor of the voltage divider from the normalized value in a wide range of frequency changes. References 16, tables 3, figures 3.

**Key words:** high-voltage divider, frequency characteristics, analytical expressions, tolerance of resistive elements, parameters adjustment.

На основі раніше розвинутої теорії широкосмугових подільників напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів вперше одержані аналітичні вирази для амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик подільника напруги з урахуванням граничного випадку неідентичності резистивних елементів високовольтного плеча. Визначений загальний характер залежностей частотних характеристик від значення допуску резистивних елементів, коефіцієнта ділення подільника напруги в широкому діапазоні зміни частоти. Запропоновані спрощені апроксимуючі вирази для максимальних значень частотних характеристик та визначено їх похибки. Рекомендовано уведення в нормативно-технічну документацію широкосмугових подільників напруги відкоригованого значення коефіцієнта ділення. Бібл. 16, табл. 3, рис. 3.

**Ключові слова:** високовольтний подільник напруги, частотні характеристики, аналітичні вирази, допуск резистивних елементів, коригування параметрів.

### REFERENCES

1. Anokhin Y.L., Brzhezitskyi V.O., Haran Ya.O., Masliuchenko I.M., Protsenko O.P., Trotsenko Ye.O. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 6, pp. 53-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.6.08>.
2. Brzhezitsky V.O., Haran Y.O., Derzhuk A.O., Protsenko O.R., Trotsenko Y.O., Dixit M.M. Ultimate effect of non-identity of capacitive elements of high-voltage arm on frequency characteristics of voltage divider (analytical research). *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 4, pp. 46-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.06>.
3. Li D., Liu K., Lei M., Zhou F., Yue C., Yu J. Study on the ratio change measurement of 1000 kV HVDC divider based on improved DC voltage summation method. *High Voltage*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 202-208. doi: <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0127>.
4. Havunen J., Hällström J. Reference switching impulse voltage measuring system based on correcting the voltage divider response with software. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, vol. 70, pp. 1-8. art. no. 1006008. doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2021.3063753>.
5. Hrbac R., Kolar V., Bartłomiejezyk M., Mlcak T., Orsag P., Vanc J. A development of a capacitive voltage divider for high voltage measurement as part of a combined current and voltage sensor. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 25-31. doi: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.4.25888>.
6. Alf-Peter E., Hällström J., Bergman A. Optimization of the design of a wideband 1000 kV resistive reference divider. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
7. Kovacevic U.D., Stankovic K.D., Kartalovic N.M., Loncar B.B. Design of capacitive voltage divider for measuring ultrafast voltages. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 99, pp. 426-433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.01.030>.
8. Thümmeler T., Marx R., Weinheimer C. Precision high voltage divider for the KATRIN experiment. *New Journal of Physics*, 2009, vol. 11, no. 10, art. no. 103007. doi: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/10/103007>.
9. Panko V., Banas S., Burton R., Ptacek K., Divin J., Dobes J. Enhanced Model of Nonlinear Spiral High Voltage Divider. *Radioengineering*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 130-136. doi: <https://doi.org/10.13164/re.2015.0130>.
10. Abdel Mageed H.M., El-Rifaie A.M., Aladdin O.M. Traceability of DC high voltage measurements using the Josephson voltage standard. *Measurement*, 2014, vol. 58, pp. 269-273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.029>.
11. Abdel Mageed H.M., Salah Eldeen R.S. Adapted Technique for Calibrating Voltage Dividers of AC High-Voltage Measuring Systems. *MAPAN*, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 11-17. doi: <https://doi.org/10.1007/s12647-019-00334-8>.
12. Lee S.H., Yu K.M., Choi J.Y., Jang S.M. Low-Uncertainty Equality Between the Voltage-Dividing and Resistance Ratio of a DC Resistive High Voltage Divider. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 1789-1795. doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-019-00157-2>.
13. Li Q., Wang L., Zhang S., Tang Y., Xu Y. Method to Determine the Ratio Error of DC High-Voltage Dividers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, vol. 61, no. 4, pp. 1072-1078. doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178672>.
14. Pan Feng, Xiao Yong, Lin Guoying, Xiao Xia, Shuai Hang. Analysis of the influencing factors for the 500 kV DC voltage reference divider used for on-site calibration. *2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2015, pp. 25-29. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2015.7494180>.

## Abstract and References

---

15. Boyko M.I., Syomkin S.O. Investigation of amplitude-temporal characteristics of a high-voltage resistive voltage divider. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 4, pp. 59-68. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.09>.

16. *MathStudio Manual*. Available at: <http://mathstud.io/manual/> (accessed 22 May 2022).

Received 28.07.2022

Accepted 22.10.2022

Published 06.05.2023

V.O. Brzhezitsky<sup>1</sup>, Doctor of Technical Science, Professor,  
Y.O. Haran<sup>1</sup>, PhD,

Y.O. Trotsenko<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor,

O.R. Protsenko<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor,

A.O. Derzhuk<sup>1</sup>, Postgraduate Student,

M.M. Dixit<sup>2</sup>, Postgraduate Student,

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine,

e-mail: y.garan@kpi.ua (Corresponding Author)

<sup>2</sup>Vishwaniketan Institute of Management Entrepreneurship and Engineering Technology,

Survey No. 52, Kumbhivali, Tal, Khalapur, Maharashtra,

410202, India,

e-mail: mandardixit78@gmail.com

### *How to cite this article:*

Brzhezitsky V.O., Haran Y.O., Trotsenko Y.O., Protsenko O.R., Derzhuk A.O., Dixit M.M. Ultimate effect of non-identity of resistive elements of high-voltage arm on frequency characteristics of broadband voltage divider (analytical research). *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 52-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.08>

O.I. Khrysto

## Energy characteristics for nanosecond current interrupter of semiconductor-magnetic pulse generator's terminal stage

**Introduction.** A semiconductor diode based on reverse current interruption is used to increase a pulse amplitude and peak power delivered on the process load. Usually, a current interrupter is located in the last stage of semiconductor-magnetic pulse generator (SMPG) and is connected in parallel to the load. **Problem.** Most of publications on this topic mostly concern with analysis of physical processes in the diode structure itself within its oscillating circuit, which is separated from previous SMPG's pulse compression stages under condition of unidirectional energy transfer from the generator to the load. In this sense, the efficiency of conversion should be determined by the joint of electromagnetic interaction between non-linear compression stages, current interrupter and process load. **Goal.** Develop a mathematical model of nanosecond current interrupter to determine its electrical and energy characteristics as a part of high-voltage parallel circuit with magnetic pulse compression, depending on the duration and moment of current interruption, the equivalent circuit for load resistance, and to set the most optimal modes of its operation. **Methodology.** In this work, it is proposed to use a comprehensive approach aimed at the study of electromagnetic processes in the SMPG's circuits with a nanosecond current interrupter, which takes into account the topology of circuit, the design parameters of saturable reactor, the magnetization curve, the equivalent load's resistance, as well as the time parameters of power switches. **Results.** Analytical expressions describing the electrical and energy characteristics of the interrupter when it operating on the active load are obtained. A numerical simulation of interrupter in the SMPG's double-loop pumping circuit is carried out, taking into account a nonlinearity of SR's magnetization curve. Three operation modes of interrupter is described, depending on the initial moment of reverse conduction current interruption. The analysis of interrupter operation on the load with an active-capacitive component is carried out. **Practical meaning.** The results of research can be applied in development of high-voltage SMPG scheme with improved energy-dynamic parameters. References 20, figures 10.

**Key words:** semiconductor-magnetic pulse generator, nanosecond current interrupter, saturable reactor, magnetization curve, numerical simulation.

У даній роботі використовується комплексний підхід, спрямований на дослідження електромагнітних процесів у схемі магнітно-напівпровідникового генератора імпульсів з наносекундним переривником струму, який враховує топологію схеми, конструктивні параметри комутуючого дроселя, криву намагнічування його осердя, еквівалентний опір навантаження, а також часові параметри періодичної комутації силових ключів. Запропоновано модель наносекундного переривника струму паралельної ланки магнітного стиснення на основі експоненційного зростання його активного опору. Отримано аналітичні вирази, що описують електричні та енергетичні характеристики переривника струму при роботі на активне навантаження. Виконане числове модулювання переривника струму у двохконтурній схемі магнітного генератора імпульсів з урахуванням нелінійності кривої намагнічування комутуючих дроселів. Розглянуто три режими його роботи в залежності від моменту початку обриву струму зворотної провідності. Проведено аналіз роботи переривника струму на навантаження з активно-ємнісною складовою. Результати досліджень можуть бути застосовано при розробці високовольтних магнітно-напівпровідникових генераторів імпульсів з поліпшеними енергодинамічними параметрами. Бібл. 20, рис. 10.

**Ключові слова:** магнітно - напівпровідниковий генератор імпульсів, переривник струму, комутуючий дросель, крива намагнічування, числове моделювання.

### REFERENCES

1. Khrysto O. Energy transfer processes in high-voltage circuits based on magnetic pulse compression. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 3-10. doi: <https://doi.org/10.15546/aeci-2020-0013>.
2. Li S., Gao J., Yang H., Zhu D., Qian B., Cui Y., Wu Q., Zhang J. Investigation on Adjustable Magnetic Pulse Compressor in Power Supply System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 1540-1547. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2830106>.
3. Choi J. Introduction of the magnetic pulse compressor (MPC) – fundamental review and practical application. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 484-492. doi: <https://doi.org/10.5370/JEET.2010.5.3.484>.
4. Guo X., Zheng D., Blaabjerg F. Power Electronic Pulse Generators for Water Treatment Application: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, no. 10, pp. 10285-10305. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2976145>.
5. Boyko N.I., Makogon A.V. The micro- and nanosecond discharges in gas bubbles for water disinfection and purification. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 3, pp. 50-54. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.08>.
6. Bozhko I.V., Zozulev V.I., Kobylchak V.V. SOS-generator for the electric discharge technology used pulse barrier discharge. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 2, pp. 63-67. doi: <https://doi.org/10.15407/teched2016.02.063>.
7. Pokryvailo A., Yankelevich Y., Wolf M. A High-Power Pulsed Corona Source for Pollution Control Applications. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, vol. 32, no. 5, pp. 2045-2054. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2004.835952>.
8. Takaki K., Takahashi K., Hayashi N., Wang D., Ohshima T. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2021, vol. 5, no. 12. doi: <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00059-9>.
9. Tamborrino A., Urbani S., Servili M., Romaniello R., Perone C., Leone A. Pulsed Electric Fields for the Treatment of Olive Pastes in the Oil Extraction Process. *Applied Sciences*, 2019, vol. 10, no. 1, art. no. 114. doi: <https://doi.org/10.3390/app10010114>.
10. Boyko N.I. Powerful generators of high-voltage pulses with nanosecond fronts. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 1, pp. 59-61. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.09>.
11. Weihua Jiang, Yatsui K., Takayama K., Akemoto M., Nakamura E., Shimizu N., Tokuchi A., Rukin S., Tarasenko V., Panchenko A. Compact solid-State switched pulsed power and its applications. *Proceedings of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 7, pp. 1180-1196. doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.829003>.

## Abstract and References

12. Rukin S.N. Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review. *Review of Scientific Instruments*, 2020, vol. 91, no. 1, art. no. 011501. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5128297>.
13. Fardi H. Numerical Analysis of Semiconductor PN Junctions Using MATLABM. *Journal of Scientific Research and Reports*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 84-98. doi: <https://doi.org/10.9734/JSRR/2015/14434>.
14. Sharabani Y., Rosenwaks Y., Eger D. Mechanism of fast current interruption in p- $\pi$ -p diodes for nanosecond opening switches in high-voltage-pulse applications. *Physical Review Applied*, 2015, vol. 4, no. 1, art. no. 014015. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.4.014015>.
15. Scharfetter D.L., Gummel H.K. Large-signal analysis of a silicon Read diode oscillator. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, vol. 16, no. 1, pp. 64-77. doi: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1969.16566>.
16. Pereverzev A.V., Litvinenko T.M. High-voltage converter for electrodischarge neutralization of sulfur dioxide. *Technical Electrodynamics*, 2015, no. 6, pp. 84-89.
17. Khrysto O.I., Zozulev V.I., Sholokh D.O. Numerical simulation of electromagnetic processes in the scheme of magnetic pulse generator. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 2, pp. 22-28.
18. Nurujjaman Md. Enhanced Euler's method to solve first order ordinary differential equations with better accuracy. *Journal of Engineering Mathematics and Statistics*, 2020, vol. 4, no. 1, pp. 1-13. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3731020>.
19. Anokhin Y.L., Brzhezitsky V.O., Haran Y.O., Masliuchenko I.M., Protsenko O.P., Trotsenko Y.O. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 6, pp. 53-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.08>.
20. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Coaxial disk shunt for measuring in the heavy-current chain of high-voltage generator of storm discharges of impulses of current of artificial lightning with the integral of action to  $15 \cdot 10^6$  J/Ohm. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 5, pp. 45-50. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.07>.

Received 01.08.2022

Accepted 22.11.2022

Published 06.05.2023

O.I. Khrysto<sup>1</sup>, PhD, Senior Researcher,

<sup>1</sup>Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, 43-A, Bogoyavlenskij Avenue, Mykolayiv, 54018, Ukraine.  
e-mail: alexander.khristo@gmail.com

### How to cite this article:

Khrysto O.I. Energy characteristics for nanosecond current interrupter of semiconductor-magnetic pulse generator's terminal stage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 59-65. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.09>



Y. Ayat, A.E. Badoud, S. Mekhilef, S. Gassab

## Energy management based on a fuzzy controller of a photovoltaic/fuel cell/Li-ion battery/supercapacitor for unpredictable, fluctuating, high-dynamic three-phase AC load

**Introduction.** Nowadays, environmental pollution becomes an urgent issue that undoubtedly influences the health of humans and other creatures living in the world. The growth of hydrogen energy increased 97.3 % and was forecast to remain the world's largest source of green energy. It can be seen that hydrogen is one of the essential elements in the energy structure as well as has great potential to be widely used in the 21st century. **Purpose.** This paper aims to propose an energy management strategy based a fuzzy logic control, which includes a hybrid renewable energy sources system dedicated to the power supply of a three-phase AC variable load (unpredictable high dynamic). Photovoltaic (PV), fuel cell (FC), Li-ion battery, and supercapacitor (SC) are the four sources that make up the renewable hybrid power system; all these sources are coupled in the DC-link bus. Unlike usual the SC was connected to the DC-link bus directly in this research work in order to ensure the dominant advantage which is a speedy response during load fast change and loads transient. **Novelty.** The power sources (PV/FC/Battery/SC) are coordinated based on their dynamics in order to keep the DC voltage around its reference. Among the main goals achieved by the fuzzy control strategy in this work are to reduce hydrogen consumption and increase battery lifetime. **Methods.** This is done by controlling the FC current and by state of charge (SOC) of the battery and SC. To verify the fuzzy control strategy, the simulation was carried out with the same system and compared with the management flowchart strategy. The results obtained confirmed that the hydrogen consumption decreased to 26.5 g and the SOC for the battery was around 62.2-65 and this proves the desired goal. References 47, tables 7, figures 19.

**Key words:** energy management strategy, fuzzy logic control, hybrid renewable energy source.

**Вступ.** В даний час забруднення навколишнього середовища стає актуальною проблемою, яка, безперечно, впливає на здоров'я людини та інших істот, які живуть у світі. Зростання водневої енергетики збільшилося на 97,3 %, і прогнозувалося, що вона залишиться найбільшим у світі джерелом зеленої енергії. Видно, що водень є одним із найважливіших елементів у структурі енергетики, а також має великий потенціал для широкого використання у 21 столітті. **Мета.** У цій статті пропонується стратегія управління енергоспоживанням, заснована на нечіткому логічному управлінні, яка включає гібридну систему відновлюваних джерел енергії, призначену для живлення трифазного змінного навантаження змінного струму (непередбачувана висока динаміка). Фотоелектричні (PV), паливні елементи (FC), літій-іонні батареї та суперконденсатори (SC) – це чотири джерела, з яких складається відновлювана гібридна енергосистема; всі ці джерела підключені до шини постійного струму. На відміну від звичайних застосувань, у цій дослідницькій роботі SC був підключений до шини постійного струму безпосередньо, щоб забезпечити домінуючу перевагу, що полягає в швидкому реагуванні при швидкій зміні навантаження та перехідних режимах навантаження. **Новизна.** Джерела живлення (PV/FC/батареї/SC) координуються на основі їхньої динаміки, щоб підтримувати напругу постійного струму біля свого еталонного значення. Серед основних цілей, досягнутих стратегією нечіткого управління у цій роботі, - зниження споживання водню та збільшення терміну служби батареї. **Методи.** Це робиться шляхом керування струмом FC та станом заряду (SOC) батареї та SC. Для перевірки стратегії нечіткого управління було проведено моделювання з тією самою системою та порівняння зі стратегією блок-схеми керування. Отримані результати підтвердили, що споживання водню знизилось до 26,5 г, а SOC для батареї становило близько 62,2-65, що доводить досягнення бажаної мети. Бібл. 47, табл. 7, рис. 19.

**Ключові слова:** стратегія енергоменеджменту, нечітке логічне управління, гібридне відновлюване джерело енергії.

### REFERENCES

1. Abdelkareem M.A., El Haj Assad M., Sayed E.T., Soudan B. Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants. *Desalination*, 2018, vol. 435, pp. 97-113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>.
2. Rezk H., Sayed E.T., Al-Dhaifallah M., Obaid M., El-Sayed A.H.M., Abdelkareem M.A., Olabi A.G. Fuel cell as an effective energy storage in reverse osmosis desalination plant powered by photovoltaic system. *Energy*, 2019, vol. 175, pp. 423-433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.167>.
3. Pelegov D., Pontes J. Main Drivers of Battery Industry Changes: Electric Vehicles – A Market Overview. *Batteries*, 2018, vol. 4, no. 4, art. no. 65. doi: <https://doi.org/10.3390/batteries4040065>.
4. Chmutina K., Wiersma B., Goodier C.I., Devine-Wright P. Concern or compliance? Drivers of urban decentralised energy initiatives. *Sustainable Cities and Society*, 2014, vol. 10, pp. 122-129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.07.001>.
5. Apergis N., Payne J.E. Renewable and non-renewable energy consumption-growth nexus: Evidence from a panel error correction model. *Energy Economics*, 2012, vol. 34, no. 3, pp. 733-738. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.04.007>.
6. Louarem S., Kebbab F.Z., Salhi H., Nouri H. A comparative study of maximum power point tracking techniques for a photovoltaic grid-connected system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 27-33. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.04>.
7. Tarhan C., Çil M.A. A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods. *Journal of Energy Storage*, 2021, vol. 40, art. no. 102676. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102676>.
8. Kong L., Yu J., Cai G. Modeling, control and simulation of a photovoltaic /hydrogen/ supercapacitor hybrid power generation system for grid-connected applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 46, pp. 25129-25144. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.097>.
9. Abdelkareem M.A., Sayed E.T., Mohamed H.O., Obaid M., Rezk H., Chae K.-J. Nonprecious anodic catalysts for low-molecular-hydrocarbon fuel cells: Theoretical consideration and current progress. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, vol. 77, art. no. 100805. doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2019.100805>.
10. da Silva Lima L., Quartier M., Buchmayr A., Sanjuan-Delmás D., Laget H., Corbisier D., Mertens J., Dewulf J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 46, art. no. 101286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>.
11. Zhao J., Burke A.F. Review on supercapacitors: Technologies and performance evaluation. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, vol. 59, pp. 276-291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.013>.
12. Poonam, Sharma K., Arora A., Tripathi S.K. Review of supercapacitors: Materials and devices. *Journal of Energy Storage*, 2019, vol. 21, pp. 801-825. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.010>.

13. Ferahtia S., Djeroui A., Mesbahi T., Houari A., Zeghlache S., Rezk H., Paul T. Optimal Adaptive Gain LQR-Based Energy Management Strategy for Battery–Supercapacitor Hybrid Power System. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 6, art. no. 1660. doi: <https://doi.org/10.3390/en14061660>.
14. Benmouna A., Becherif M., Boulon L., Dépature C., Ramadan H.S. Efficient experimental energy management operating for FC/battery/SC vehicles via hybrid Artificial Neural Networks-Passivity Based Control. *Renewable Energy*, 2021, vol. 178, pp. 1291-1302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.038>.
15. Majumder I., Dash P.K., Dhar S. Real-time Energy Management for PV–battery–wind based microgrid using on-line sequential Kernel Based Robust Random Vector Functional Link Network. *Applied Soft Computing*, 2021, vol. 101, art. no. 107059. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107059>.
16. Ferahtia S., Djeroui A., Rezk H., Houari A., Zeghlache S., Machmoum M. Optimal control and implementation of energy management strategy for a DC microgrid. *Energy*, 2022, vol. 238, art. no. 121777. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121777>.
17. Kamel A.A., Rezk H., Abdelkareem M.A. Enhancing the operation of fuel cell-photovoltaic-battery-supercapacitor renewable system through a hybrid energy management strategy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no. 8, pp. 6061-6075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.052>.
18. Sedaghati R., Shakarami M.R. A novel control strategy and power management of hybrid PV/FC/SC/battery renewable power system-based grid-connected microgrid. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 44, pp. 830-843. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.014>.
19. Paul A.L. *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 238 p.
20. Choudar A. *Gestion Locale de l'Energie et Commande Coordonnée d'un Générateur PV Actif Connecté à un Micro-Réseau Electrique Intelligent*. PhD Thesis, ENP Algiers, Algeria (2017). (Fra).
21. Larminie J., Dicks A. *Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed.* John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, NJ, USA, 2003. 418 p.
22. Gebregergis A., Pillay P., Rengaswamy R. PEMFC Fault Diagnosis, Modeling, and Mitigation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 295-303. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2036677>.
23. Maiti T.K., Singh J., Dixit P., Majhi J., Bhushan S., Bandyopadhyay A., Chattopadhyay S. Advances in perfluorosulfonic acid-based proton exchange membranes for fuel cell applications: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2022, vol. 12, art. no. 100372. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100372>.
24. Bendjedja B., Rizoug N., Boukhnifer M., Bouchafaa F., Benbouzid M. Influence of secondary source technologies and energy management strategies on Energy Storage System sizing for fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 25, pp. 11614-11628. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.166>.
25. Wang N., Qu Z., Zhang G. Modeling analysis of polymer electrolyte membrane fuel cell with regard to oxygen and charge transport under operating conditions and hydrophobic porous electrode designs. *ETransportation*, 2022, vol. 14, art. no. 100191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100191>.
26. Wilson D., Bousbaine A., Andrade J. Simulink model for a hydrogen pem fuel cell for automotive applications. *The 10th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2020)*, 2021, pp. 146-151. doi: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1176>.
27. Fernandez L.M., Garcia P., Garcia C.A., Torreglosa J.P., Jurado F. Comparison of control schemes for a fuel cell hybrid tramway integrating two DC/DC converters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, no. 11, pp. 5731-5744. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.132>.
28. Chen W., Liang J., Yang Z., Li G. A Review of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications and Beyond. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 4363-4368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.783>.
29. Lu L., Han X., Li J., Hua J., Ouyang M. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272-288. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>.
30. Saw L.H., Somasundaram K., Ye Y., Tay A.A.O. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2014, vol. 249, pp. 231-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.052>.
31. Hassan Q., Jaszczur M., Al-Jiboory A.K., Hasan A., Mohamad A. Optimizing of hybrid renewable photovoltaic/wind turbine/super capacitor for improving self-sustainability. *Energy Harvesting and Systems*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 151-164. doi: <https://doi.org/10.1515/ehs-2021-0095>.
32. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdulateef J., Hasan A., Mohamad A. An analysis of photovoltaic/supercapacitor energy system for improving self-consumption and self-sufficiency. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 680-695. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.021>.
33. Ren H., Wu Q., Gao W., Zhou W. Optimal operation of a grid-connected hybrid PV/fuel cell/battery energy system for residential applications. *Energy*, 2016, vol. 113, pp. 702-712. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.091>.
34. Ali Moussa M., Derrouazin A., Latroch M., Aillerie M. A hybrid renewable energy production system using a smart controller based on fuzzy logic. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 46-50. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.07>.
35. Guichi A., Mekhilef S., Berkouk E.M., Talha A. Optimal control of grid-connected microgrid PV-based source under partially shaded conditions. *Energy*, 2021, vol. 230, art. no. 120649. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120649>.
36. Stroe D.-I., Zaharof A., Iov F. Power and Energy Management with Battery Storage for a Hybrid Residential PV-Wind System – A Case Study for Denmark. *Energy Procedia*, 2018, vol. 155, pp. 464-477. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.033>.
37. Behrooz F., Mariun N., Marhaban M., Mohd Radzi M., Ramli A. Review of Control Techniques for HVAC Systems – Nonlinearity Approaches Based on Fuzzy Cognitive Maps. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 3, art. no. 495. doi: <https://doi.org/10.3390/en11030495>.
38. Gassab S., Radjeai H., Mekhilef S., Choudar A. Power management and coordinated control of standalone active PV generator for isolated agriculture area-case study in the South of Algeria. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2019, vol. 11, no. 1, art. no. 015305. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5064444>.
39. Han Y., Chen W., Li Q., Yang H., Zare F., Zheng Y. Two-level energy management strategy for PV-Fuel cell-battery-based DC microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 35, pp. 19395-19404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.013>.
40. Kadri A., Marzougui H., Aouiti A., Bacha F. Energy management and control strategy for a DFIG wind turbine/fuel cell hybrid system with super capacitor storage system. *Energy*, 2020, vol. 192, art. no. 116518. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116518>.
41. Rezaei H., Abdollahi S.E., Abdollahi S., Filizadeh S. Energy management strategies of battery-ultracapacitor hybrid storage systems for electric vehicles: Review, challenges, and future trends. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 53, art. no. 105045. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105045>.
42. Zhang Y., Wei W. Model construction and energy management system of lithium battery, PV generator, hydrogen production unit and fuel cell in islanded AC microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, no. 33, pp. 16381-16397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.155>.
43. Zhang X., Liu L., Dai Y. Fuzzy State Machine Energy Management Strategy for Hybrid Electric UAVs with PV/Fuel

## Abstract and References

Cell/Battery Power System. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, pp. 1-16. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/2852941>.

44. Tang D., Wang H. Energy Management Strategies for Hybrid Power Systems Considering Dynamic Characteristics of Power Sources. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 158796-158807. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3131168>.

45. Shavelkin A.A., Gerlici J., Shvedchikova I.O., Kravchenko K., Kruhliak H.V. Management of power consumption in a photovoltaic system with a storage battery connected to the network with multi-zone electricity pricing to supply the local facility own needs. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 36-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.06>.

46. Choudar A., Boukhetala D., Barkat S., Brucker J.-M. A local energy management of a hybrid PV-storage based distributed generation for microgrids. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 90, pp. 21-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.067>.

47. Liao J., Jiang Y., Li J., Liao Y., Du H., Zhu W., Zhang L. An improved energy management strategy of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell system for stratospheric airship.

*Acta Astronautica*, 2018, vol. 152, pp. 727-739. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.09.007>.

Received 30.08.2022

Accepted 03.11.2022

Published 06.05.2023

Yahia Ayat<sup>1</sup>, PhD,

Abd Essalam Badoud<sup>1</sup>, Professor,

Saad Mekhilef<sup>2</sup>, Professor,

Samir Gassab<sup>1</sup>, Doctor of Electrical Engineering,

<sup>1</sup>Automatic Laboratory of Setif, Electrical Engineering Department, University of Ferhat Abbas Setif 1, Setif, 19000, Algeria,

e-mail: ayat.yahia@yahoo.com;

badoudabde@univ-setif.dz (Corresponding Author);

guessab.s@gmail.com

<sup>2</sup>School of Software and Electrical Engineering,

Department of Telecommunications, Electrical, Robotics and Biomedical Engineering,

Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia,

e-mail: saad@um.edu.my

### How to cite this article:

Ayat Y., Badoud A.E., Mekhilef S., Gassab S. Energy management based on a fuzzy controller of a photovoltaic/fuel cell/Li-ion battery/supercapacitor for unpredictable, fluctuating, high-dynamic three-phase AC load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 66-75. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.10>

M. Kadri, A. Hamouda, S. Sayah

**Efficient method for transformer models implementation in distribution load flow matrix**

**Introduction.** Most distribution networks are unbalanced and therefore require a specific solution for load flow. There are many works on the subject in the literature, but they mainly focus on simple network configurations. Among the methods dedicated to this problem, one can refer to the load flow method based on the bus injection to branch current and branch current to bus voltage matrices. **Problem.** Although this method is regarded as simple and complete, its drawback is the difficulty in supporting the transformer model as well as its winding connection types. Nevertheless, the method requires the system per unit to derive the load flow solution. **Goal.** In the present paper, our concern is the implementation of distribution transformers in the modeling and calculation of load flow in unbalanced networks. **Methodology.** Unlike previous method, distribution transformer model is introduced in the topology matrices without simplifying assumptions. Particularly, topology matrices were modified to take into account all winding types of both primary and secondary sides of transformer that conserve the equivalent scheme of an ideal transformer in series with an impedance. In addition, the adopted transformer models overcome the singularity problem that can be encountered when switching from the primary to the secondary side of transformer and inversely. **Practical value.** The proposed approach was applied to various distribution networks such as IEEE 4-nodes, IEEE 13-nodes and IEEE 37-nodes. The obtained results validate the method and show its effectiveness. References 24, tables 4, figures 9.

**Key words:** distribution systems, unbalanced load flow, distribution transformer models, topology network matrix.

**Вступ.** Більшість розподільчих мереж незбалансовані і тому потребують спеціального рішення для потоку навантаження. У літературі є багато робіт на цю тему, але переважно вони присвячені простим мережевим конфігураціям. Серед методів, присвячених цій проблемі, можна назвати метод потоку навантаження, заснований на введенні шини в матрицю струму відгалуження і відгалуження струму в матрицю напруги шини. **Проблема.** Хоча цей метод вважається простим та повним, його недоліком є складність підтримки моделі трансформатора, а також типів з'єднання його обмоток. Проте метод вимагає системи на одиницю для отримання рішення про потік навантаження. **Мета.** У цій статті нас цікавить застосування розподільних трансформаторів для моделювання та розрахунку потоку навантаження у незбалансованих мережах. **Методологія.** На відміну від попереднього методу, модель розподільного трансформатора вводиться в матриці топології без спрощення припущень. Зокрема, матриці топології були змінені, щоб врахувати всі типи обмоток як первинної, так і вторинної сторін трансформатора, які зберігають еквівалентну схему послідовно ідеально включеного трансформатора з імпедансом. Крім того, прийняті моделі трансформаторів долають проблему сингулярності, з якою можна зіткнутися при перемиканні з первинної на вторинну обмотку трансформатора і навпаки. **Практична цінність.** Пропонований підхід був застосований до різних розподільних мереж, таких як IEEE з 4 вузлами, IEEE з 13 вузлами та IEEE з 37 вузлами. Отримані результати підтверджують метод та показують його ефективність. Бібл. 24, табл. 4, рис. 9.

**Ключові слова:** розподільні системи, незбалансований потік навантаження, моделі розподільних трансформаторів, матриця топології мережеві.

## REFERENCES

- Rahmani A., Slimani L., Bouktir T. Unbalanced load flow with hybrid wavelet transform and support vector machine based error-correcting output codes for power quality disturbances classification including wind energy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 6, pp. 62-69. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.09>.
- Djabali C., Bouktir T. Simultaneous allocation of multiple distributed generation and capacitors in radial network using genetic-salp swarm algorithm. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 59-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.08>.
- Jangra J., Vadhera S. Load flow analysis for three phase unbalanced distribution feeders using Matlab. *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2017, pp. 862-866. doi: <https://doi.org/10.1109/I2CT.2017.8226252>.
- Sameni A., Nassif A.B., Opathella C., Venkatesh B. A modified Newton-Raphson method for unbalanced distribution systems. *2012 International Conference on Smart Grid (SGE)*, 2012, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.1109/SGE.2012.6463955>.
- De Vas Gunawardena A.P.S.G., Ranatunga N.T., Samarathunga L.L., Weerawansa S.D.T., Jayatunga U. Three phase asymmetrical power flow algorithm using current injection technique. *2016 Electrical Engineering Conference (EECon)*, 2016, pp. 37-42. doi: <https://doi.org/10.1109/EECon.2016.7830932>.
- Kumar A., Jha B.K., Singh D., Misra R.K. A New Current Injection Based Power Flow Formulation. *Electric Power Components and Systems*, 2020, vol. 48, no. 3, pp. 268-280. doi: <https://doi.org/10.1080/15325008.2020.1758846>.
- Ahmadi H., Marti J.R., von Meier A. A Linear Power Flow Formulation for Three-Phase Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, no. 6, pp. 5012-5021. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2533540>.
- Wang Y., Zhang N., Li H., Yang J., Kang C. Linear three-phase power flow for unbalanced active distribution networks with PV nodes. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 321-324. doi: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2017.00240>.
- Garces A. A Linear Three-Phase Load Flow for Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, no. 1, pp. 827-828. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2394296>.
- Bazrafshan M., Gatsis N. Comprehensive Modeling of Three-Phase Distribution Systems via the Bus Admittance Matrix. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, vol. 33, no. 2, pp. 2015-2029. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2728618>.
- Petridis S., Blanas O., Rakopoulos D., Stergiopoulos F., Nikolopoulos N., Voutetakis S. An Efficient Backward/Forward Sweep Algorithm for Power Flow Analysis through a Novel Tree-Like Structure for Unbalanced Distribution Networks. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 4, art. no. 897. doi: <https://doi.org/10.3390/en14040897>.
- Samal P., Ganguly S. A modified forward backward sweep load flow algorithm for unbalanced radial distribution systems. *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286413>.
- Segura S., da Silva L.C.P., Romero R. Generalised single-equation load flow method for unbalanced distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011, vol. 5, no. 3, art. no. 347. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0204>.
- González-Morán C., Arbolea P., Mohamed B. Matrix Backward Forward Sweep for Unbalanced Power Flow in  $\alpha\beta$  frame. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 148, pp. 273-281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.026>.

## Abstract and References

15. Balamurugan K., Srinivasan D. Review of power flow studies on distribution network with distributed generation. *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2011, pp. 411-417. doi: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147281>.
16. Subrahmanyam J.B.V., Radhakrishna C., Pandukumar K. A simple and direct approach for unbalanced radial distribution system three phase load flow solution. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2010, vol. 2, no. 5, pp. 452-459.
17. Abul'Wafa A.R. A network-topology-based load flow for radial distribution networks with composite and exponential load. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 91, pp. 37-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.04.016>.
18. Şeker A.A., Gözel T., Hocaoglu M.H. BIBC Matrix Modification for Network Topology Changes: Reconfiguration Problem Implementation. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 10, art. no. 2738. doi: <https://doi.org/10.3390/en14102738>.
19. Kersting W.H. *Distribution System Modeling and Analysis. 4th Ed.* CRC Press, 2017. 546 p.
20. Dugan R.C. A perspective on transformer modeling for distribution system analysis. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, 2003, pp. 114-119. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1267146>.
21. Chen T.-H., Chen M.-S., Inoue T., Kotas P., Chebli E.A. Three-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991, vol. 6, no. 4, pp. 1671-1681. doi: <https://doi.org/10.1109/61.97706>.
22. Schneider K.P., Chassin D., Chen Y., Fuller J.C. Distribution power flow for smart grid technologies. *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.1109/PSCE.2009.4840078>.
23. *IEEE PES Test Feeder*. Available at: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/> (Accessed 22.05.2022).
24. *GridLAB-D*. Available at: <https://sourceforge.net/projects/gridlab-d/> (Accessed 22.05.2022).

Received 15.08.2022

Accepted 13.11.2022

Published 06.05.2023

M. Kadri<sup>1</sup>, Associate Professor of Electrical Engineering,  
A. Hamouda<sup>2</sup>, Doctor of Electrical Engineering, Professor  
S. Sayah<sup>1</sup>, Doctor of Electrical Engineering, Professor,  
<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, QUERE Laboratory,  
Farhat Abbas University, Setif 1, 19000, Algeria,  
e-mail: kadri\_moussa@yahoo.fr;  
samir.sayah@univ-setif.dz (Corresponding Author)  
<sup>2</sup> Optics and Precision Mechanics Institute, QUERE Laboratory,  
Farhat Abbas University, Setif 1, 19000, Algeria,  
e-mail: a\_hamouda1@yahoo.fr

### How to cite this article:

Kadri M., Hamouda A., Sayah S. Efficient method for transformer models implementation in distribution load flow matrix. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 76-82. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.11>

G. Srinivasan, V. Mahesh Kumar Reddy, P. Venkatesh, E. Parimalasundar

## Reactive power optimization in distribution systems considering load levels for economic benefit maximization

**Introduction.** The need for electrical energy has been increased sharply due to hasty growth in industrials, social and economic improvements. From the previous studies, it has been agreed that almost 13 % of the total power generated is wasted as heat loss at distribution level. It has been extensively recognized that the node voltage profile along the distribution system can be enhanced under steady state power transfer controlled by proper reactive power compensation. Capacitors have been acknowledged as reactive power compensating device in distribution systems to achieve technical and economical benefits. **Novelty** of this work is the application of Archimedes optimization algorithm for reactive power optimization in distribution systems so as to obtain an improved solution and also a real 94-bus Portuguese network and modified 12-bus network has been taken and validated for three different load levels which are totally new. **Purpose** of the proposed work is to maximize the economic benefit by reducing the power loss and capacitor purchase cost at three different load conditions subject to satisfaction of equality and inequality constraints. **Methods.** The economic benefit has been validated using Archimedes optimization algorithm for three load levels considering three distribution systems. **Results.** The computational outcomes indicated the competence of the proposed methodology in comparison with the previously published works in power loss minimization, bus voltage enhancement and more economical benefit and proved that the proposed methodology performs well compared to other methods in the literature. References 17, tables 6, figures 6.

**Key words:** reactive power compensation, distribution system, power loss minimization, economic benefit, Archimedes optimization algorithm.

**Вступ.** Потреба в електроенергії різко зросла через стрімке зростання промисловості, соціальних та економічних поліпшень. З попередніх досліджень було встановлено, що майже 13 % усієї електроенергії, що виробляється, витрачається марно у вигляді втрат тепла на рівні розподілу. Загально визнано, що профіль напруги вузла вздовж розподільчої системи може бути поліпшений при передачі потужності в режимі, що встановився, керованої відповідною компенсацією реактивної потужності. Конденсатори були визнані як пристрої компенсації реактивної потужності в розподільчих системах для досягнення технічних та економічних переваг. **Новизна** цієї роботи полягає у застосуванні алгоритму оптимізації Архімеда для оптимізації реактивної потужності в розподільчих системах з метою отримання покращеного рішення, а також було взято та перевірено реальну португальську мережу з 94 шинами та модифіковану мережу з 12 шинами для трьох різних рівнів навантаження, які абсолютно нові. **Мета** запропонованої роботи полягає в тому, щоб максимізувати економічний ефект за рахунок зниження втрат потужності та вартості кутівлі конденсатора за трьох різних режимів навантаження за умови дотримання обмежень рівності та нерівності. **Методи.** Економічний ефект було підтверджено з використанням алгоритму оптимізації Архімеда для трьох рівнів навантаження з урахуванням трьох систем розподілу. **Результати** розрахунків показали компетентність запропонованої методології порівняно з раніше опублікованими роботами в галузі мінімізації втрат потужності, підвищення напруги на шині та більшої економічної вигоди, а також довели, що запропонована методологія добре працює порівняно з іншими методами в літературі. Бібл. 17, табл. 6, рис. 6.

**Ключові слова:** компенсація реактивної потужності, розподільча система, мінімізація втрат потужності, економічний ефект, алгоритм оптимізації Архімеда.

### REFERENCES

1. Soma G.G. Optimal Sizing and Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm. *Electricity*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 187-204. doi: <https://doi.org/10.3390/electricity2020012>.
2. Saddique M.W., Haroon S.S., Amin S., Bhatti A.R., Sajjad I.A., Liaqat R. Optimal Placement and Sizing of Shunt Capacitors in Radial Distribution System Using Polar Bear Optimization Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, vol. 46, no. 2, pp. 873-899. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04747-5>.
3. Tamilselvan V., Muthulakshmi K., Jayabarathi T. Optimal capacitor placement and sizing in a radial distribution system using clonal selection algorithm. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol. 10, no. 8, pp. 3304-3312.
4. Bansal A.K., Sharma M.P. A Novel Analytical Technique for Optimal Allocation of Capacitors in Radial Distribution Systems. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 2017, vol. 49, no. 2, pp. 236-246. doi: <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.2.6>.
5. Kola Sampangi S., Thangavelu J. Optimal capacitor allocation in distribution networks for minimization of power loss and overall cost using water cycle algorithm and grey wolf optimizer. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, vol. 30, no. 5, art. no. e12320. doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12320>.
6. Srinivasan G., Lokasree B.S. Siting and Sizing of Capacitors in Distribution Systems for Annual Cost Savings Using ISSA-WF. 2021 *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 2021, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/i-PACT52855.2021.9696659>.
7. Salimon S.A., Adepoju G.A., Adebayo I.G., Adewuyi O.B., Amuda S.O. Simultaneous Placement and Sizing of Distributed Generation Units and Shunt Capacitors on Radial Distribution Systems Using Cuckoo Search Algorithm. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2021, vol. 40, no. 12, pp. 43-58. doi: <https://doi.org/10.9734/cjast/2021/v40i1231380>.
8. Salimon S.A., Baruwa A.A., Amuda S.O., Adeleke H.A. Optimal Placement and Sizing of Capacitors in Radial Distribution Systems: A Two-Stage Method. *Journal of Engineering Research and Reports*, 2020, vol. 19, no. 2, pp. 31-43. doi: <https://doi.org/10.9734/jerr/2020/v19i217229>.
9. Riaño F.E., Cruz J.F., Montoya O.D., Chamorro H.R., Alvarado-Barrios L. Reduction of Losses and Operating Costs in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm and Mathematical Optimization. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 4, art. no. 419. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10040419>.
10. Montoya O.D., Gil-González W., Garcés A. On the Conic Convex Approximation to Locate and Size Fixed-Step Capacitor Banks in Distribution Networks. *Computation*, 2022, vol. 10, no. 2, art. no. 32. doi: <https://doi.org/10.3390/computation10020032>.
11. Rahiminejad A., Foroughi Nematollahi A., Vahidi B., Shahrooyan S. Optimal Placement of Capacitor Banks Using a New Modified Version of Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm. *AUT Journal of Modeling and Simulation*, 2018, vol. 50, no. 2, pp. 171-180. doi: <https://doi.org/10.22060/miscj.2018.14594.5111>.

## Abstract and References

12. Belbachir N., Zellagui M., Settoul S., El-Bayeh C.Z., Bekkouche B. Simultaneous optimal integration of photovoltaic distributed generation and battery energy storage system in active distribution network using chaotic grey wolf optimization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 52-61. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.09>.
13. Venkatesh B., Ranjan R. Data structure for radial distribution system load flow analysis. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2003, vol. 150, no. 1, pp. 101-106. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20030013>.
14. Hashim F.A., Hussain K., Houssein E.H., Mabrouk M.S., Al-Atabany W. Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*, 2021, vol. 51, no. 3, pp. 1531-1551. doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>.
15. Balakishan P., Chidambaram I.A., Manikandan M. Improvement of power quality in grid-connected hybrid system with power monitoring and control based on internet of things approach. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 44-50. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.06>.
16. Das D. Novel method for solving radial distribution networks. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 1994, vol. 141, no. 4, pp. 291-298. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19949966>.
17. Aman M.M., Jasmon G.B., Mokhlis H., Bakar A.H.A. Optimal placement and sizing of a DG based on a new power

stability index and line losses. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, vol. 43, no. 1, pp. 1296-1304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.053>.

Received 22.07.2022

Accepted 06.11.2022

Published 06.05.2023

G. Srinivasan<sup>1</sup>, Professor,

V. Mahesh Kumar Reddy<sup>2</sup>, Assistant Professor,

P. Venkatesh<sup>3</sup>, Assistant Professor,

E. Parimalasundar<sup>3</sup>, Associate Professor,

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering,

Thamirabharani Engineering College, Thachanallur,

Tirunelveli – 627358, Tirunelveli, Tamilnadu, India,

e-mail: prof.gsrinivasan@gmail.com (Corresponding Author)

<sup>2</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering,

Kandula Srinivasa Reddy Memorial College of Engineering,

Yerramasupalli, Kadappa – 516003, Andhra Pradesh, India,

e-mail: vmahesh@ksrmce.ac.in

<sup>3</sup>Department of Electrical & Electronics Engineering,

Sree Vidyanikethan Engineering College,

Tirupati, AP – 517102, India,

e-mail: venkatesh.p@vidyanikethan.edu;

parimalasundar.e@vidyanikethan.edu

### How to cite this article:

Srinivasan G., Mahesh Kumar Reddy V., Venkatesh P., Parimalasundar E. Reactive power optimization in distribution systems considering load levels for economic benefit maximization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 83-89. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.12>