

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

УДК 621.313.332

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.127>

КОМБІНОВАНЕ РЕГУЛЮВАННЯ КОМУТОВАНИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ Й ВЕНТИЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНО ПРАЦЮЮЧОЇ МІНІ-ГЕС

Л.І. Мазуренко*, докт. техн. наук, О.В. Джура**, канд. техн. наук, М.О. Шихненко***,
канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: mlins@ied.org.ua

Розроблено принципи роботи та статичну імітаційну модель електрогенеруючої частини джерела автономного електроживлення, виконаного на основі гідроелектроагрегата з асинхронним генератором потужністю 275 кВА і комбінованою конденсаторно-напівпровідниковою системою збудження, від якого живиться симетричне пасивне навантаження. Початкове збудження генератора здійснюється батареєю конденсаторів початкового збудження. За малих навантажень споживачів величина напруги генератора підтримується постійною шляхом регулювання реактивної потужності напівпровідникового перетворювача, а за великих навантажень регулювання напруги відбувається в результаті комутації додаткових батарей конденсаторів. Розроблена методика розрахунку запропонованого джерела електроживлення базується на схемі заміщення АГ. Проведено розрахунки статичних характеристик генератора, працюючого з постійною частотою обертання ротора, та проаналізовано отримані статичні характеристики за двох заданих величин коефіцієнта потужності навантаження. Бібл. 5, рис. 4, табл.

Ключові слова: міні-ГЕС, асинхронний генератор, вентильний перетворювач, комутовані конденсатори.

Вступ. За наявності достатніх гідроресурсів мікро- та міні-ГЕС можуть забезпечити резервне та автономне електроживлення споживачів, які знеструмлюються внаслідок аварійних ситуацій у мережі або ж не охоплені централізованим електропостачанням [1, 2]. Відповідно для гідроелектроагрегатів, оснащених асинхронними генераторами (АГ), постає задача розробки систем збудження, які забезпечують прийнятні споживачеві параметри електричної енергії та є надійними і економічними. Початкове збудження й регулювання величини напруги автономних АГ найчастіше здійснюється найчастіше вентильними (напівпровідниковими) та конденсаторними системами збудження. Перші більш доцільні за змінної частоти обертання АГ, зокрема для АГ вітроустановок [3]. Другі застосовуються переважно за стабілізованої частоти обертання АГ, що потребує застосування регульованих приводів, таких як регульовані гідротурбіни та двигуни внутрішнього згорання з регуляторами частоти обертання [4, 5]. Суттєвою перевагою вентильних систем збудження є можливість плавного регулювання напруги й насичення АГ у широкому діапазоні частот обертання, а недоліками – несинусоїдальність напруги АГ та підвищена вартість агрегату. Конденсаторні системи збудження забезпечують прийнятну для практично всіх побутових споживачів величину коефіцієнту гармонік напруги, проте характеризуються доволі широким діапазоном зміни напруги АГ і відповідно більшими втратами або ж гіршим використанням габаритної потужності машини. Вентильно-конденсаторні системи збудження (ВКСЗ), які містять нерегульовану батарею конденсаторів початкового збудження (БКПЗ) і вентильний перетворювач (ВП), об'єднують у собі переваги вентильних і вентильно-конденсаторних систем. Додаткове зменшення встановленої потужності ВП у ВКСЗ можливе завдяки використанню додаткових батарей комутованих конденсаторів (БКК).



Метою роботи є розробка принципів роботи та статичної імітаційної моделі електрогенеруючої частини джерела автономного електроживлення, виконаного на основі гідроелектроагрегата з асинхронним генератором і комбінованою конденсаторно-напівпровідниковою системою збудження, яка містить БКПЗ, БКК та ВП.

Схемне рішення джерела автономного електроживлення (ДАЕ), яке запропоновано (рис. 1), містить АГ з приводом від регульованої гідротурбіни (ГТ), від якого живиться трифазне симетричне навантаження. Початкове збудження АГ здійснюється від БКПЗ. Регулювання величини статорної напруги АГ здійснюється ВП обмеженої потужності, який виконується за схемою трифазного мостового інвертора з фільтруючими дроселями в колах змінного струму і БКК, що комутуються трифазними комутаторами.

Статична імітаційна модель. Для розрахунку й дослідження статичних характеристик АГ, працюючого в складі ДАЕ рис. 1, було запропоновано еквівалентну схему заміщення АГ з комбінованою вентиляно-конденсаторною системою збудження (рис. 2).

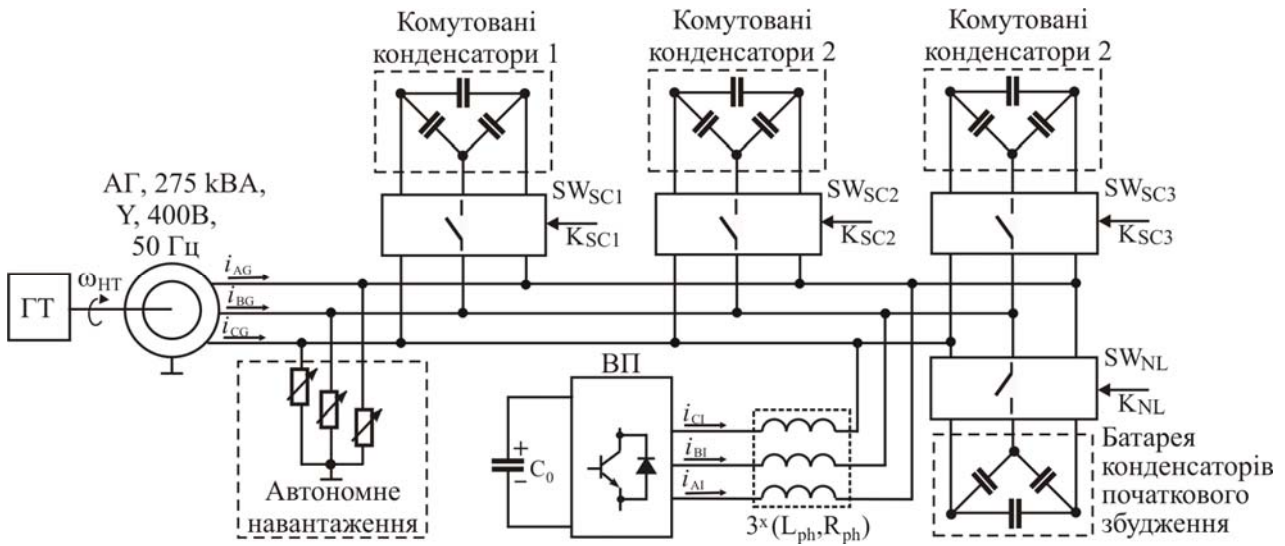


Рис. 1

Умовами дотримання балансу активної та реактивної потужностей у схемі рис. 2 є рівність нулю дійсної та уявної частини суми провідностей Y_S , Y_m та Y_R :

$$\operatorname{Re}(Y_S + Y_m + Y_R) = 0, \quad \operatorname{Im}(Y_S + Y_m + Y_R) = 0, \quad (1, 2)$$

$$\text{де } Y_S = \left(r_1 + jFX_{ls} - \frac{jX_{esb}Z_L / F}{Z_L - jX_{esb} / F} \right)^{-1}, \quad Y_m = \frac{1}{jFX_m}, \quad Y_R = \frac{1}{jFX_{lr} + r_2 F / (F - \nu)}, \quad X_{esb} = X_{cb} + X_{nb},$$

$$Z_L = R_L + jX_L = z_l e^{j\varphi_L}.$$

Прийmemo частоту обертання АГ постійною ($\nu = \text{const}$). З (1) отримуємо рівняння для розрахунку відносної електричної частоти генератора F :

$$\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2} + \frac{r_2}{F(F - \nu)(r_2^2 / (F - \nu)^2 + X_{lr}^2)} = 0, \quad (3)$$

$$\text{де } a_1 = r_1 + \frac{X_{esb}^2 R_L}{F^2 a_3}, \quad a_2 = FX_{ls} - \frac{R_L X_{esb}}{Fa_3} - \frac{X_L X_{esb} (X_L - X_{esb} / F)}{Fa_3}, \quad a_3 = R_L^2 + (X_L - X_{esb} / F)^2.$$

Рівняння (3) є нелінійним і вирішується відомими методами вирішення нелінійних рівнянь.

З (2) отримуємо рівняння реактивного опору контуру намагнічування:

$$X_m = X_{mb} F = \frac{-(a_1^2 + a_2^2)(r_2^2 + X_{lr}^2 s^2 F^2)}{(X_{lr} s^2 F (a_1^2 + a_2^2) + a_2 (r_2^2 + X_{lr}^2 s^2 F^2))}, \quad (4)$$

де $s = F / (F - \nu)$ – ковзання АГ.

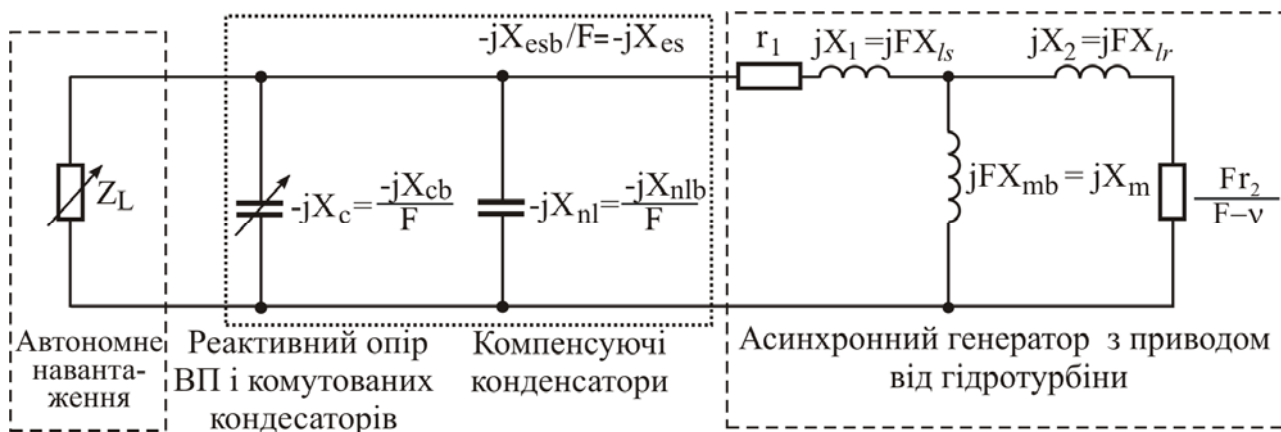


Рис. 2

Напруга кола намагнічування U_m знаходиться з використанням характеристики намагнічування АГ $X_{mb} = U_{mb}(X_{mb})$, знятої на базовій частоті, та знайденої величини відносної частоти F : $U_m = U_{mb}(X_{mb} \cdot F) / F$.

Величини фазного струму, фазної напруги і вхідної провідності на фазу АГ визначаються з таких рівнянь:

$$I_{ph} = U_m Y_S, U_{ph} = -jI_{ph} X_{es} z_l e^{j\varphi_L} / (z_l e^{j\varphi_L} - jX_{es}), y_1 = (r_1 + jX_1 + (Y_m + Y_R)^{-1})^{-1} = 0. \quad (5-7)$$

Повна і активна потужність навантаження відповідно дорівнюють

$$P_L = 3|U_{ph} I_{ph}| \cos \varphi_L, S_L = 3|U_{ph} I_{ph}|. \quad (8, 9)$$

Діюче значення першої гармоніки фазного струму ВП визначається таким чином:

$$I_{ph1} = |U_{ph}| (1/X_{es} - 1/X_{nl} - 1/X_{sc}), \quad (10)$$

де X_{sc} – опір на фазу підключених до АГ комутуваних конденсаторів.

Алгоритм регулювання напруги АГ побудуємо таким способом. БКПЗ вважатимемо постійно підключеною, крім випадку аварійних режимів. За малих навантажень споживачів величину напруги будемо утримувати на заданому рівні з допомогою ВП. Якщо в процесі збільшення навантаження споживачів потужність ВП досягне номінальної величини і величина напруги стане меншою заданого нижнього порогового рівня, включається перша БКК. Якщо в результаті подальшого збільшення навантаження величина напруги стане знову меншою заданого нижнього порогового рівня, вмикається друга БКК. Якщо перша і друга БКК підключені й величина напруги також стає меншою заданого нижнього порогового рівня, вмикається третя БКК. У разі зменшення навантаження відключення БКК відбувається в зворотному порядку за верхнім пороговим рівнем.

Номінальну реактивну провідність ВП на фазу визначаємо так:

$$Y_{Nvsc} = S_{Nig} Q_{Nvsc p.u.}^* / (3(U_{vsc}^*)^2), \quad (11)$$

де S_{Nig} – повна номінальна потужність АГ; $Q_{Nvsc p.u.}^*$ – задана номінальна потужність ВП, в.о.; U_{vsc}^* – задана величина фазної напруги на інтервалі постійної величини напруги (за малих навантажень споживачів).

Ємності всіх БКК вважатимемо однаковими. Величину ємності на фазу однієї БКК орієнтовно визначатимемо з такого рівняння:

$$C_{SCph} = (1/(X_{esm} \omega_{mIG}) - Y_{Nvsc} / \omega_{Nvsc} - 1/(X_{nl} \omega_{nl})) / (N_{SCB}), \quad (12)$$

де X_{esm} – сумарний реактивний опір на фазу системи збудження за максимального навантаження АГ (за заданого максимального струму й заданої величини фазної напруги АГ); ω_{mIG} – кутова електрична частота, яка відповідає режиму роботи АГ за максимального навантажен-

ня споживачів; $\omega_{N_{vsc}}$ – кутова електрична частота наприкінці інтервалу постійної величини напруги; ω_{nl} – кутова електрична частота в режимі х.х. АГ; N_{SCB} – кількість БКК.

Результати досліджень. На основі запропонованої схеми заміщення й викладеного алгоритму регулювання напруги була створена статична математична модель і проведено розрахунки статичних характеристик АГ потужністю 275 кВА системи (рис. 1) за трьох БКК. Розрахунки проводились за активного ($\cos \varphi_L = 1$, рис. 3) і активно-індуктивного ($\cos \varphi_L = 0.92$, рис. 4) автономного навантаження споживачів. Величину U_{vsc}^* було задано на рівні 1.025 в.о., частоту обертання ротора АГ прийнято рівною $\nu = 1$ в.о., а задану номінальну потужність ВП $Q_{N_{vsc} p.u.}^*$ – 0.1 в.о. За 1 в.о. потужності було прийнято величину потужності 275 кВА, за 1 в.о. напруги – величину напруги 230 В, за 1 в.о. електричної частоти АГ – величину частоти 50 Гц, 1 в.о. струму – 398.5 А. Ширину гістерезисної смуги гістерезисних регуляторів БКК прийнято нульовою. Використовувались такі параметри АГ: число пар полюсів – 2; номінальна потужність/напруга/частота (з'єднання): 275 кВА/ 400 В/ 50 Гц (Y); активний опір фази статора/ротора: 0.0093/0.0087 Ом; індуктивність розсіювання статора/ротора: 0.000111 Гн. Характеристика намагнічування АГ наведена в таблиці.

Фазний струм [А]	0.5	2	5	10	26	101	184	405	804
Фазна напруга [В]	29	61	71	80	110	197	237	273	304

Ємність на фазу БКПЧ, за якої в режимі холостого ходу АГ його фазна напруга дорівнює $U_{vsc}^* = 1.025$ в.о., склала $2.25 \cdot 10^{-3} \Phi$. У разі активного навантаження ємність кожної БКК на фазу, за якої напруга АГ буде не нижчою заданої в діапазоні навантажень (0...111) %, відповідно до отриманих результатів розрахунку дорівнює $1.54 \cdot 10^{-4} \Phi$. У разі активно-індуктивного навантаження за результатами розрахунків напруга АГ буде не нижчою заданої в зазначеному вище діапазоні активної складової навантажень ((0...111) %), якщо ємність на фазу кожної БКК дорівнюватиме $8.99 \cdot 10^{-4} \Phi$. Частота струму статора зі зростанням навантаження міні-ГЕС монотонно зменшується від 1 в.о. в режимі холостого ходу до 0.98 в.о. Тому на практиці буде доцільно частоту обертання підтримувати на рівні 1.01 в.о., аби отримати діапазон зміни електричної частоти $50_{-1\%}^{+1\%}$ Гц. Номінальна активна потужність АГ складає 86 % від

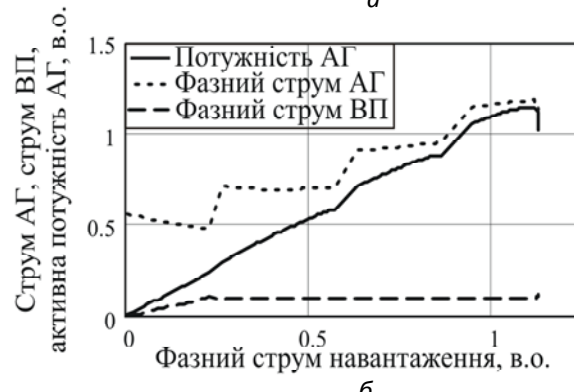
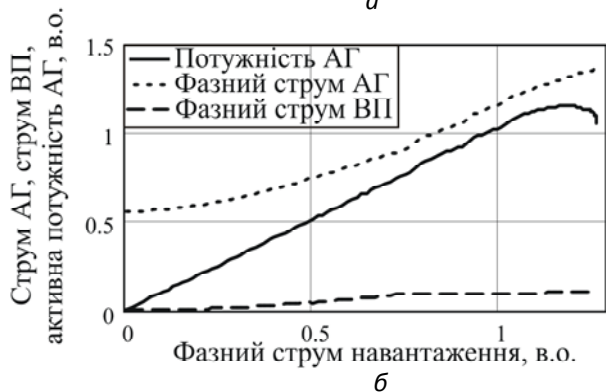
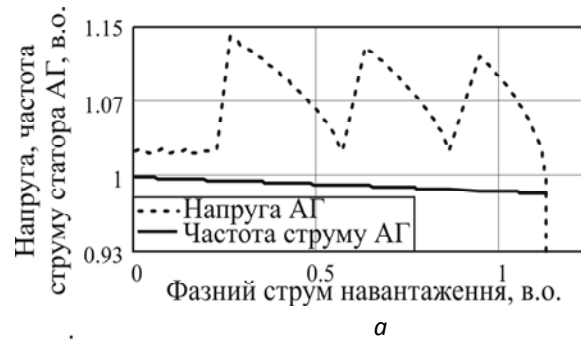
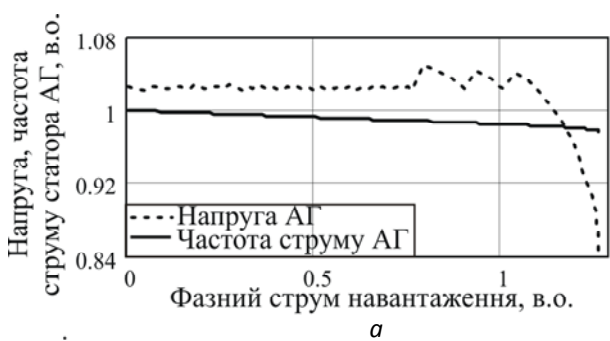


Рис. 3

Рис. 4

повної номінальної потужності машини. Діапазон зміни вихідної напруги і АГ у діапазоні зміни активної складової навантаження (0...111) % складає (102.5...105) % за $\cos\varphi_L=1$ і (102.5...113.5) % за $\cos\varphi_L=0.92$ від величини номінальної напруги АГ. Струм ВП змінюється відповідно до алгоритму керування ВП: за малих навантажень монотонно зростає, а за великих залишається практично незмінним. За $\cos\varphi_L=1$ ділянка статичних характеристик, на якій напруга підтримується постійною, значно ширше, ніж за $\cos\varphi_L=0.92$, оскільки ВП, крім компенсації реактивної потужності АГ, компенсує й реактивну потужність споживачів та має обмежену потужність.

Висновки. Запропоноване схемне рішення й алгоритм керування електрогенеруючої частини автономної міні-ГЕС з АГ завдяки зменшеній потужності ВП дають змогу досягти зменшення її вартості порівняно з варіантом використання АГ з вентильним збудженням і водночас, як порівняти з електроагрегатом на основі АГ з конденсаторним збудженням, забезпечити більш вузький діапазон напруги і відповідно менші втрати в генераторі. Розроблена на основі запропонованої схеми заміщення імітаційна статична модель дає змогу за різних величин коефіцієнта потужності навантаження, максимального навантаження споживачів і максимальної потужності НП визначити діапазон зміни вихідної напруги АГ з комбінованою конденсаторно-напівпровідниковою системою збудження обмеженої потужності, який працює в складі автономно працюючої міні-ГЕС на трифазне симетричне навантаження. За фіксованої номінальної потужності ВП, незмінної кількості БКК і заданої величини переважувальної здатності АГ, зменшення коефіцієнта потужності навантаження призводить як до збільшення величини ємностей БКК, так і до розширення діапазону вихідної потужності. Результуюча зовнішня характеристика АГ за запропонованого алгоритму регулювання напруги на першій ділянці – ділянці малих навантажень – являє собою відрізок прямої з нульовим нахилом, а на другому, третьому і четвертому має «зубчасту» форму. Також слід зазначити, що в разі змінного коефіцієнта потужності навантаження вирішення питання вибору ємностей БКК не є однозначним і потребує подальших досліджень.

Отримані результати можуть бути використані під час розробки і проектування одногенераторних ДАЕ, побудованих на основі АГ з приводом від гідротурбін або інших видів регульованих приводів.

Фінансується за держбюджетною темою III-24-22 «Розроблення вдосконалених електромеханічних і електромагнітних систем електричних станцій та методів їх діагностування.» (шифр «Агрегат-3»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України від 29.06.2021 р. (протокол №8). Державний реєстраційний номер теми 0122U000840. КПКВК 6541030.

1. Hermann S., Welsch M. Using Micro Hydro Power for Rural Off-grid Village Electrification. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:502782/FULLTEXT01.pdf> (Accessed: 26.04.2023)
2. Maina D. K., Sanjari M. J. and Nair N. -K. C. Voltage and Frequency Response of Small Hydro Power Plant in Grid Connected and Islanded Mode. *2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. Auckland, New Zealand. 2018. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2018.8757944>.
3. Kimura N., Nakatani K. and Morizane T. Maximum power point tracking of wind power generator using inverter excited induction machine. *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference*. Fukuoka, Japan. 2010. Pp. 1295–1300. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2010.5685950>.
4. Mazurenko L.I., Kotsiuruba A.V., Dzhura O.V., Shykhnenko M.O. Voltage and Power Regulation of an Induction Generator-Based Hydroelectric Power Plant. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, 21–24 September 2021. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598549>.
5. Vanco W. E., Silva F. B., Goncalves F. A. S. and Bissochi C. A. Evaluation of the Capacitor Bank Design for Self-Excitation in Induction Generators. *IEEE Latin America Transactions*. 2018. Vol. 16. No 2. Pp. 482–488. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8327403>.

COMBINED VOLTAGE REGULATION BY SWITCHED CAPACITORS AND ELECTRONIC VOLTAGE CONVERTER OF INDUCTION GENERATOR OPERATING IN OFF-GRID MINI-HYDRO POWER PLANT

L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, M.O. Shykhnenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,
Beresteiskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: mlins@ied.org.ua

The principles of operation and a static simulation model of the power-generating equipment of the autonomous power supply source based on a hydroelectric unit with a 275 kVA induction generator and a combined capacitor-inverter excitation system supplying a symmetrical passive load have been developed. The initial excitation of the generator is carried out by a bank of capacitors of the initial excitation. During low power demand the generator voltage is kept constant by adjusting the reactive power of the semiconductor converter, and at high loads, the voltage is adjusted as a result of the switching of additional capacitor banks. The developed methodology for performance analysis the proposed power supply source is based on the IG equivalent circuit. Computations of the static characteristics of the generator operating with a constant rotor speed were carried out and the obtained static characteristics were analyzed for two set values of the load power factor. Ref. 5, fig. 4, table.

Keywords: mini hydroelectric power plant, induction generator, electronic converter, switched capacitors.

Надійшла: 31.05.2023

Прийнята: 13.06.2023

Submitted: 31.05.2023

Accepted: 13.06.2023