

РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ З САМОЗБУДЖЕННЯМ ЗА ДОПОМОГОЮ СІМІСТОРНО-КОМУТОВАНОЇ КОНДЕНСАТОРНОЇ БАТАРЕЇ

М.В. Пушкар, С.О. Бур'ян, канд. техн. наук, **В.В. Михайленко**, канд. техн. наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Представлено алгоритм роботи та результати експериментального тестування системи стабілізації напруги асинхронного генератора із самозбудженням на основі аналітичних виразів для статичних характеристик генератора. Показано, що запропоноване рішення забезпечує стабілізацію напруги асинхронного генератора при зміні навантаження та може знайти застосування в автономних енергогенеруючих системах для живлення активних та активно-реактивних навантажень, де висувуються високі вимоги до генерованої напруги. Бібл. 7, рис. 7.

Ключові слова: асинхронний генератор, самозбудження, регулювання напруги, батарея конденсаторів, сімістор.

Вступ. Асинхронні генератори (АГ) з самозбудженням від конденсаторних батарей широко застосовуються в сучасних автономних системах генерування електричної енергії. Аналізуючи існуючі схеми систем стабілізації напруги АГ, представлені в [1, 3], можна зробити висновок, що найбільш поширеними з них є системи з комутованими батареями конденсаторів, які дають змогу ступінчасто регулювати напругу АГ. Але більшість таких систем заснована на ітераційному підході до підбору необхідної ємності конденсаторної ступені, яку необхідно підключити до генератора. У роботі [4] висвітлено та доведено актуальність використання тиристорно-комутованої конденсаторної батареї для регулювання напруги АГ для генераторів малої та великої потужностей, що забезпечить досить високі показники якості регульованої напруги. У роботах [5, 7] було отримано вирази для залежностей частоти та амплітуди напруги АГ від ємності конденсаторної батареї та навантаження, підключеного до АГ, а також наведено графіки для цих залежностей.

Метою роботи є підвищення якості регулювання напруги АГ за рахунок розробки алгоритму для системи генерування напруги АГ на базі сімісторно-комутованої батареї конденсаторів, який базується на підході, запропонованому в [5-7] із врахуванням аналітичних виразів для напруги АГ. Такий підхід дасть змогу на основі аналітичного виразу для границь самозбудження та генеруємої напруги точно обирати необхідну ємність залежно від зміни навантаження, забезпечуючи завдяки цьому підвищення динамічних показників якості регулювання напруги та зменшення кількості комутацій у батареї.

Матеріали досліджень. Стандартна математична модель асинхронного генератора в довільній системі координат описується наступними нелінійними диференціальними рівняннями [2, 6]:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_S}{dt} &= U_S - R_S i_S - \omega_e J \Psi_S, \\ \frac{d\Psi_R}{dt} &= -R_R i_R + (n_p \omega - \omega_e) J \Psi_R, \end{aligned} \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $\Psi_S = [\Psi_{SF} \quad \Psi_{SG}]^T$, $\Psi_R = [\Psi_{RF} \quad \Psi_{RG}]^T$ – вектори потокозчеплень статора і ротора; $i_S = [i_{SF} \quad i_{SG}]^T$, $i_R = [i_{RF} \quad i_{RG}]^T$ – вектори струмів статора і ротора; $U_S = [U_{SF} \quad U_{SG}]^T$ – вектор статорної напруги; R_S і R_R – активні опори статора та ротора; n_p – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість ротора АГ; ω_e – кутова швидкість обертання довільної системи координат F-G.

Резистивні навантаження, які підключені паралельно з конденсаторами до обмоток статора АГ, показано на рис. 1.

Конденсатори підключені в трикутник, тому для еквівалентного перетворення при розрахунках достатньо прийняти загальну ємність батареї $C = 3C_{\Delta}$. Тоді схема заміщення однієї з фаз АГ буде мати вигляд, показаний на рис. 2.

Індекс А позначає проекцію вектора на вісь А фіксованої системи координат статора А-В. Тоді згідно з першим законом Кірхгофа маємо

$$i_S + i_C + i_L = 0, \quad (2)$$

де $i_S = [i_{SA} \ i_{SB}]^T$, $i_C = [i_{CA} \ i_{CB}]^T$, $i_L = [i_{LA} \ i_{LB}]^T$ – вектори струмів у фіксованій системі координат статора А-В.

Оскільки $i_C = C \frac{dU_S}{dt}$, то в системі координат А-В буде справедливим вираз

$$-C \frac{dU_S}{dt} = i_S + i_L, \quad (3)$$

де $U_S = [U_{SA} \ U_{SB}]^T$ – вектор напруги статора в фіксованій системі координат А-В; R_L – активний опір навантаження; C – ємність конденсаторної батареї.

Виходячи з наведених вище формул, в [5, 6] було отримано вираз для амплітуди генерованої напруги:

$$|U_S^*| = \frac{\omega_e^* L_M^* i_M^*}{\sqrt{(1 + Y_L R_S - C \omega_e^{*2} L_{\sigma S})^2 + \omega_e^{*2} (Y_L L_{\sigma S} + C R_S)^2}}, \quad (4)$$

де $L_M = f(i_M)$ – індуктивність намагнічування АГ, яка є статичною функцією $i_M = \sqrt{i_{MF}^2 + i_{MG}^2}$ – амплітуди намагнічуючого струму АГ; $Y_L = 1/R_L$ – величина провідності навантаження; $L_{\sigma S}$ – індуктивність розсіювання статора.

Вираз (4) дозволяє регулювати напругу АГ, точно підбираючи ємність конденсаторів, які необхідно підключити до генератора, так щоб рівність правої й лівої частин виразу зберігалася.

Задача регулювання та стабілізації напруги АГ може бути вирішена різними способами: зміною швидкості обертання генератора, ємності конденсаторної батареї чи зміною величини навантаження. У багатьох випадках швидкість обертання АГ є або сталою, або не регулюється (наприклад, у гідро- і вітрогенераторах), тоді як навантаження та ємність є керованими параметрами.

Розглянемо регулювання напруги АГ за допомогою зміни ємності конденсаторної батареї відповідно до варіацій величини навантаження, підключеного до АГ, використовуючи сімісторно-комутовану батарею конденсаторів. Навантажувальні характеристики АГ з сімісторною комутацією ємностей при сталій швидкості обертання представлені на рис. 3, де U_S – напруга на виході генератора; I_L – струм навантаження, який є пропорційним активній потужності навантаження.

Ці характеристики є спадаючими, і у випадку, якщо напруга досягне певного мінімального значення (границі самозбудження), то генератор припинить видавати напругу і виникне так званий колапс напруги [6]. Щоб уникнути цього, необхідно комутувати додаткові конденсатори для збільшення величини напруги АГ. Також важливо стабілізувати величину напруги в межах ($U_{\max} \dots U_{\min}$) для забезпечення нормальної роботи обладнання, яке живиться від генератора.

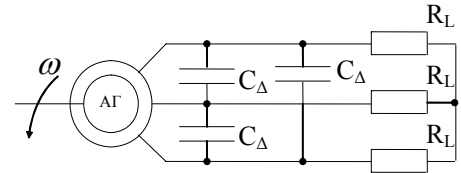


Рис. 1

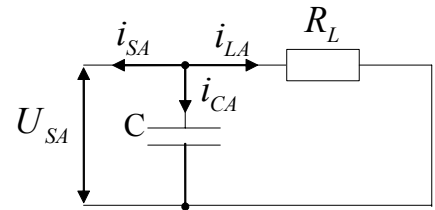


Рис. 2

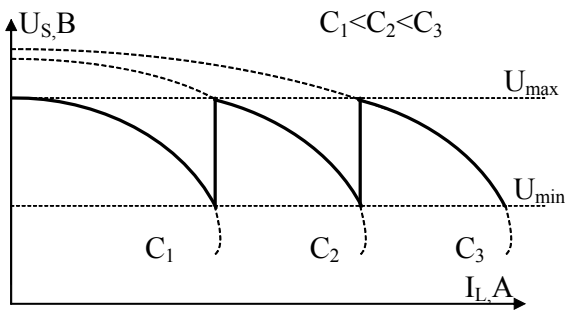


Рис. 3

Комутована конденсаторна батарея повинна мати декілька ступеней з різною ємністю, які потрібно підключати чи відключати залежно від напруги на виході АГ.

Зазвичай [3, 4] у таких системах використовують ступінчасту комутацію конденсаторів, з величиною ємності ступеней C , $2C$, $4C$ і т.д. Такий підхід забезпечує можливість отримати широке різноманіття ємностей різного значення, не збільшуючи при цьому кількість ступеней у цілому.

Пристрій керування батареєю має забезпечувати не тільки швидку комутацію її ступеней, але й проводити цю комутацію лише в той момент часу, коли напруга в цій фазі є нульовою, що забезпечить відсутність стрибків струму при комутації конденсаторів та гарантуватиме надійну роботу системи стабілізації.

На рис. 4 представлено функціональну схему такої системи.

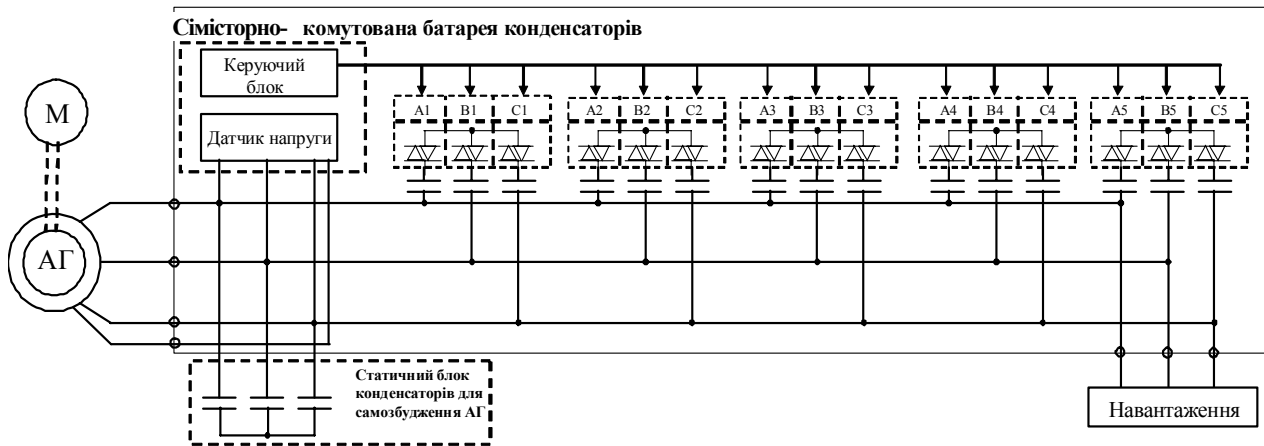


Рис. 4

Система регулювання напруги АГ має шість блоків конденсаторів, один з них статичний і є постійно підключеним до генератора для забезпечення його самозбудження. Інші входять до сімісторно-комутованої батареї конденсаторів і підключені до виходів АГ за допомогою сімісторних ключів. Сімістори контролюються за допомогою фазних блоків керування ключами (A1-A5, B1-B5, C1-C5) залежно від напруги в фазі, де встановлено сімістор, та сигналу керування від керуючого блока. Керуючий блок у свою чергу генерує сигнали керування для фазних блоків керування та вираховує, які саме ємності потрібно підключити або відключити для забезпечення величини напруги АГ на заданому рівні. Величини ємностей в ступенях складають ряд: C , $2C$, $4C$, $8C$, $16C$, що становить загалом 32 різні варіанти, які можна підключити до АГ. За допомогою датчика напруги керуючий блок отримує значення напруги на клеммах АГ. Фазні блоки керування сімісторами мають проводити комутацію конденсатора тільки в той момент часу, коли напруга у цій фазі є нульовою.

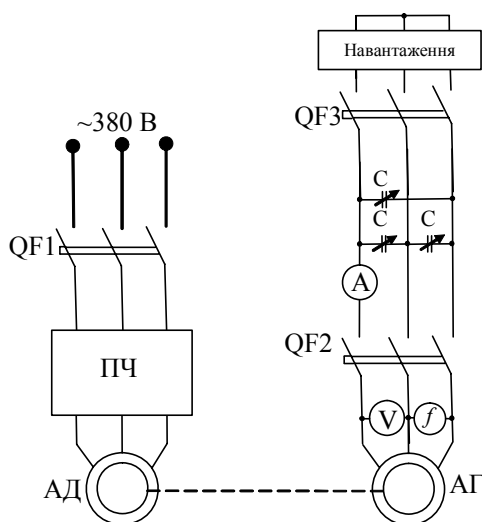


Рис. 5

Алгоритм роботи системи полягає в наступному: генератор самозбуджується від статичного блока конденсаторів, після виходу на усталений режим роботи до нього підключається

генератор. Після виходу на усталений режим роботи до нього підключається

навантаження, і система стабілізації, керуючись сигналами датчиків напруги та струму, який є пропорційним навантаженню, на основі виразу (4) визначає, яка ємність має бути підключена, для того щоб напруга на клеммах АГ знаходилась в діапазоні $\pm 5\%$ від номінального значення. При зміні навантаження, підключеного до АГ, система вираховує нове значення ємності, необхідне для стабілізації напруги, і знаючи ємність, яка вже була підключена до системи, підключає або відключає необхідну кількість ступеней конденсаторної батареї.

Експериментальні дослідження з метою верифікації розробленого алгоритму роботи системи були проведені на розробленій раніше експериментальній установці для дослідження АГ, функціональна схема якої представлена на рис. 5. Вона складається з трифазного асинхронного двигуна (АИРМ63В4У3, 370 Вт, 380 В, 50 Гц, 1450 об/хв), який використовується як АГ. Наступні параметри генератора було отримано експериментально: $R_S=27\ \text{Ом}$, $R_R=17,9\ \text{Ом}$, $L_{\sigma S}=L_{\sigma R}=0,08266\ \text{Гн}$, $n_p=2$, $L_{MAX}=1,03115\ \text{Гн}$, $L_{M0}=0,6345\ \text{Гн}$.

АГ з'єднано жорсткою муфтою з привідним асинхронним двигуном (4АМ80В3У3, 2,2 кВт, 380 В, 50 Гц, 2800 об/хв), що керується за допомогою перетворювача частоти (ПЧ) АВВ АСS140. Більша потужність привідного двигуна у порівнянні з АГ, а також активація функції компенсації ковзання в перетворювачі АСS140 забезпечують жорстку механічну характеристику привідного двигуна та стабілізацію швидкості його обертання на заданому рівні. Конденсатори C реалізуються у вигляді комутованих конденсаторних батарей загальною ємністю 150 мкФ. Збір експериментальних даних забезпечується за допомогою вбудованих функцій перетворювача частоти, контрольно-вимірних пристроїв, розташованих на установці, та за допомогою системи тестування електроприводів, яка дає можливість відображати отримані дані напряму через MATLAB.

Розрахункові та експериментальні статичні залежності величини генерованої напруги від ємності, представлені на рис. 6.

З графіків бачимо, що різниця між експериментальною та промодельованою характеристиками знаходиться в межах похибки в 5%.

На рис. 7 показано графік перехідних процесів напруги АГ, підключеного в трикутник, при зміні опору навантаження з 200 до 180 Ом.

При навантаженні в 200 Ом напруга генератора становить 223 В. За 1 с опір навантаження змінюється до 180 Ом, напруга АГ спадає до 184 В, спрацьовує система стабілізації, і за 4,5 с напруга стабілізується на рівні 225 В.

Точність регулювання напруги може бути підвищена підбором величин ємностей ступеней конденсаторної батареї під конкретний генератор та діапазон навантаження.

Висновки. Використовуючи аналітичні вирази для залежності напруги АГ від ємності конденсаторної

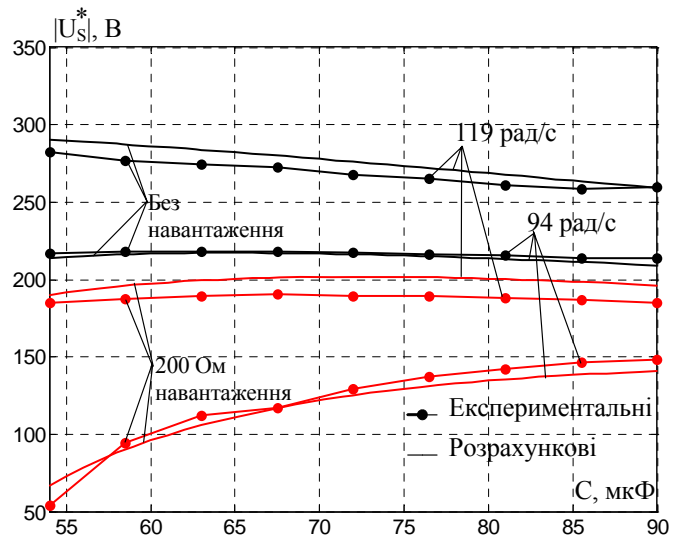


Рис. 6

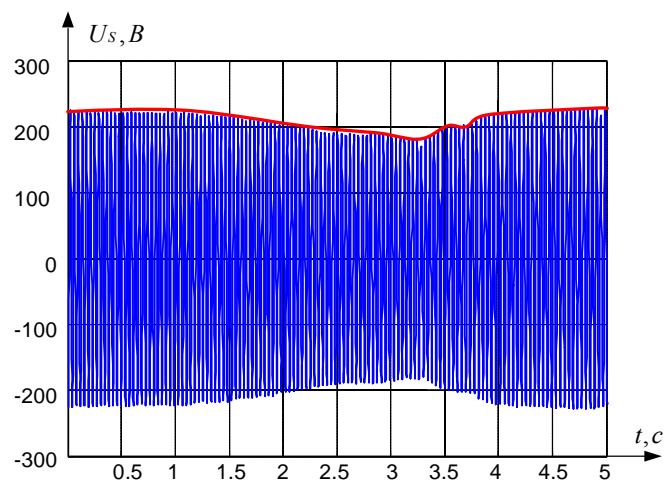


Рис. 7

батареї, можна підвищити точність регулювання його напруги.

Представлений алгоритм роботи системи стабілізації може використовуватись на практиці в системах стабілізації напруги АГ за допомогою батарей конденсаторів змінної ємності. При цьому необхідно враховувати те, що на практиці система є нелінійною, параметри генератора залежать від швидкості його обертання та струму, які мають або бути вимірюваними, або їх необхідно оцінювати.

Наступним кроком дослідження буде апробація отриманих в [7] аналітичних залежностей для АГ, який живить активно-індуктивне навантаження.

1. *Торопцев Н.Д.* Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 87 с.
2. *Bodson M., Kiselychnyk O.* Nonlinear dynamic model and stability analysis of self-excited induction generators // Proceedings of the American Control Conference, June 29 - July 1, 2011, San Francisco, CA. – 2011. – P. 4574–4579.
3. *Chauhan, Y.K., Jain S.K., Singh B.* A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications, "Industry Applications // IEEE Transactions. – 2010. – Vol. 46. No.2. – P. 720–730.
4. *Haque M.H.* Voltage regulation of a stand-alone induction generator using thyristor-switched capacitors, Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008 // IEEE International Conference on , 24-27 Nov. 2008. – P. 34–39.
5. *Kiselychnyk O., Bodson M., Wang J.* Model of a Self-Excited Induction Generator for the Design of Capacitor-Controlled Voltage Regulators // Proc. of 21-st IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, June 25-28, 2013. – Crete, Greece. – P. 149–154.
6. *Kiselychnyk O., Pushkar M., Bodson M.* Critical loads of induction generators with series self-excitation // Electromechanical and energy saving systems. Thematic issue "Problems of automatic electric drive. Theory and applications." – 2012. – N3/2012 (19). – P. 48–52.
7. *Kiselychnyk O., Jihong Wang, Bodson M., Pushkar M.* Steady-state and dynamic characteristics of self-excited induction generators with resistive-inductive loads // Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014 International Symposium on, 18-20 June 2014, Naples, Italy, 2014. – P. 625–630.

УДК 621.313.332

М.В. Пушкар, С.А. Бурьян, канд. техн. наук, **В.В. Михайленко**, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

Регулирование напряжения асинхронных генераторов с самовозбуждением с помощью симисторно-коммутируемой конденсаторной батареи

Представлены алгоритм работы и результаты экспериментального тестирования системы стабилизации напряжения асинхронного генератора с самовозбуждением на основе аналитических выражений для статических характеристик генератора. Показано, что предложенное решение обеспечивает стабилизацию напряжения асинхронного генератора при изменении нагрузки и может применяться в автономных энергогенерирующих системах для питания активных и активно-реактивных нагрузок, где предъявляются высокие требования к генерируемому напряжению. Библ. 7, рис. 7.

Ключевые слова: асинхронный генератор, самовозбуждение, регулирование напряжения, батарея конденсаторов, симистор.

M. Pushkar, S. Buryan, V. Mykhailenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

The voltage regulation of self-excited induction generator with triac-switched capacitor bank

The algorithm of operation and the results of experimental verification of the self-excited induction generator voltage control system are presented. The algorithm is based on the analytical equations for the steady-state characteristics of the generator. It is shown that the proposed solution provides voltage regulation of the induction generator with the changes of load and could be used in stand-alone power generating systems for feeding active and active-inductive load with high requirements to the value of generated voltage. References 7, figures 7.

Key words: induction generator, self-excitation, voltage control, capacitor bank, verification, TRIAC.

Надійшла 30.07.2014

Received 30.07.2014