

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.313.322

В.І. Хоменко, канд. техн. наук, викладач вищої категорії, ORCID 0000-0003-0722-2573

В.Б. Нізімов, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262

Придніпровський державний металургійний коледж, м Кам'янське
Дніпровський державний технічний університет, м Кам'янське

ОСОБЛИВОСТІ РЕЖИМІВ ЗБУДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЗНАЧНИХ ЗБУРЕННЯХ

Підвищення надійності живлення споживачів співставної потужності від автономної генеруючої установки у динамічних режимах накиду співставного навантаження досягається за рахунок форсування збудження із застосуванням ємнісних накопичувачів енергії і встановлення закономірностей та залежностей їх впливу на режими роботи синхронних генераторів. Досліджено вплив ємнісного накопичувача енергії в контурі збудження синхронного генератора на підвищення стійкості роботи автономної генеруючої установки. Запропоновано і обґрунтовано алгоритм керування контуром збудження генеруючої установки, з урахуванням зміни силової схеми та вмикання ємнісних елементів в інерційний контур.

Дослідженнями доведено, що параметри контуру збудження суттєво впливають на стійкість синхронного генератора та стабілізацію вихідної напруги. Доведено, що при одній і тій самій кратності найбільшої напруги збуджувача швидкодія даного пристрою в режимі форсування збудження приблизно в 20 разів вища, ніж традиційних систем збудження. Дослідженнями встановлено, що схема з примусовою ємнісною комутацією дозволяє надійно вимикати збуджувач у випадку пошкодження елементів останнього.

Ключові слова: автономна генеруюча установка, режим збудження, динамічна стійкість.

Вступ

Основним режимом роботи синхронних генераторів автономних генеруючих установок є режим, близький до номінального. У генеруючих установках (ГУ) для промислового виробництва електроенергії, які працюють в енергосистемі, підключення споживачів співставної потужності є малоімовірним.

На відміну від промислових ГУ особливістю зазначених генеруючих установок є їх автономність, тому у випадку стихійних лих і природних катастроф при підключенні споживачів співставної потужності вони втрачають стійкість через інерційність контуру збудження та значного динамічного падіння напруги, що призводить до відключення попередньо підключених споживачів.

Незважаючи на високу швидкодію тиристорних збуджувачів через інерційність контура збудження СГ відбувається аперіодичне запізнювання струму збудження, що часто є причиною втрати стійкості генератора. Тому підвищення швидкодії режимів форсування досягається за рахунок застосування випереджаючої фази напруги збудження і підвищення її кратності. Крім того, підвищення швидкодії режиму форсування може досягатися за рахунок зменшення інерційності каналів виміру і керування напругою.

Проте застосування відомих способів і пристроїв форсування напруги збудження не забезпечує зниження інерційності самого контура збудження, тобто струм в обмотці збудження (ОЗ) завжди має аперіодичне запізнювання по відношенню до форсувальної напруги, що у результаті визначає стійкість СГ.

© В.І. Хоменко, В.Б. Нізімов, 2020

Для підвищення динамічної стійкості СГ необхідно компенсувати електромагнітну інерційність контуру збудження синхронного генератора шляхом зміни силової схеми та вмикання ємнісних елементів в інерційний контур, наприклад, ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ). Причому вмикання ємнісних елементів можливо або послідовно з обмоткою збудження, або паралельно з ОЗ [1, 2], що призводить до складних енергообмінних процесів в контурах синхронного генератора.

Крім того, у випадку короткого замикання (КЗ) в мережі, яку живить АГУ, аварійний режим ліквідується максимальним струмовим захистом. При внутрішніх коротких замиканнях обмотки статора генератора для обмеження обсягу руйнування необхідно форсоване гасіння поля. Форсоване гасіння поля може бути виконано з вмиканням розрядного резистора автоматом гасіння поля (АГП), переводом збуджувача в режим інвертування або застосуванням імпульсно-дугових комутаторів. Використання АГП в тиристорних системах збудження є недоцільним через можливості виникання перенапруг, а режим інвертування збуджувача принципово є неможливим при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора синхронного генератора [3, 4].

Постановка задачі

Теоретичне та експериментальне дослідження режимів збудження автономного синхронного генератора при значних збуреннях для зменшення негативних наслідків.

Результати роботи

Розглянемо розряд конденсатора в контурі збудження при наявності струму при живленні від трифазного мостового несиметричного перетворювача. У випадку лінійного електричного кола, тобто коли всі його параметри зберігають свої значення постійними незалежно від діючих в електричному колі напруг і струмів, застосуємо принцип накладання. При розряді ємності НЕ залежність струму від величини напруги має вигляд:

$$i_f = U_{c0} \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{Cp}{L_f Cp^2 + R_f Cp + 1} \quad (3)$$

Представимо ці рівняння в пакеті Matlab/Simulink (рис. 1).

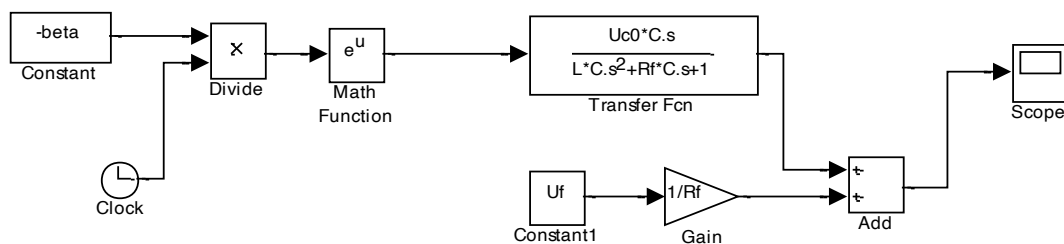


Рисунок 1 – Математична модель контуру збудження СГ при наявності струму збудження

Розрахунок перехідних процесів виконаний для синхронного генератора типу МСА-72/4: $P_n = 12$ кВт; $U_c = 230$ В; $i_{ln} = 37,6$ А; $U_{fn} = 27$ В; $i_{fn} = 23$ А; $n_n = 1500$ об/хв. Параметри контуру збудження синхронного генератора:

$U_{c0} = 100$ В; $L_f = 0,006$ Гн; $C = 0,0003$ Ф; $R_f = 1$ Ом; $U_\phi = 20$ В; $\beta = 8,33$.

Результати розрахунків приведені на рис. 2.

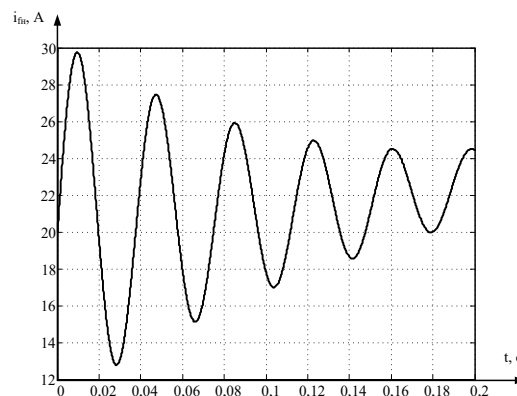


Рисунок 2 – Розрахункові залежності струму збудження СГ

На підставі аналізу розрахункової залежності можна сформулювати алгоритм керування контуром збудження: при $t > 0$ і $p_{if} = 0$, необхідно вивести конденсатор із контуру збудження, при цьому $U_f = U_{f\phi}$ і $X_L = X_C$.

У випадку повної компенсації, струм контуру збудження буде безінерційно слідувати за напругою форсування [5].

Вказаний алгоритм керування контуром збудження СГ реалізований в математичній моделі, приведеній на рис. 3. Однак розрахункові залежності (рис.2) не враховують вплив демпферних контурів та обмоток статора СГ.

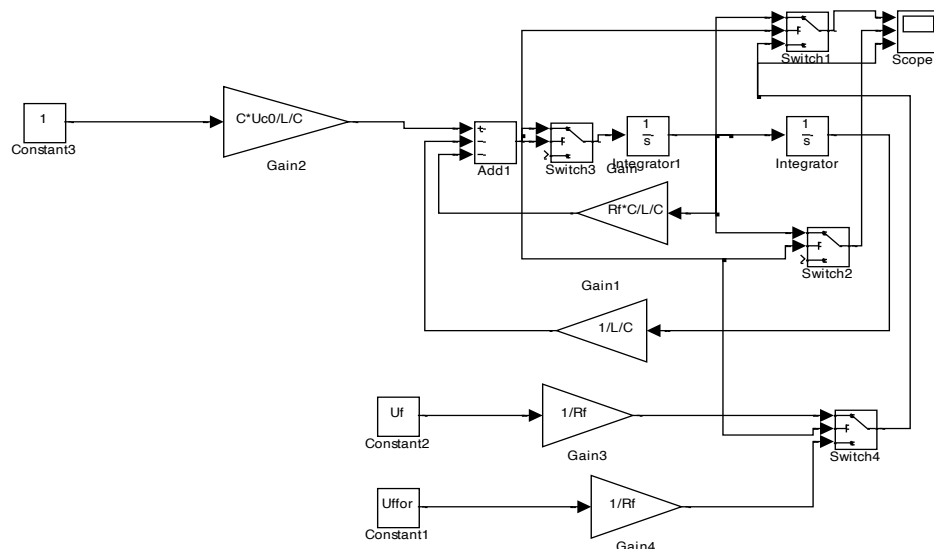


Рисунок 3 – Математична модель алгоритму керування контуром збудження СГ

На рис. 4 представлено принципову схему системи збудження синхронного генератора в складі автономної генеруючої установки із застосуванням накопичувача енергії в контурі збудження, який забезпечує режим форсування струму.

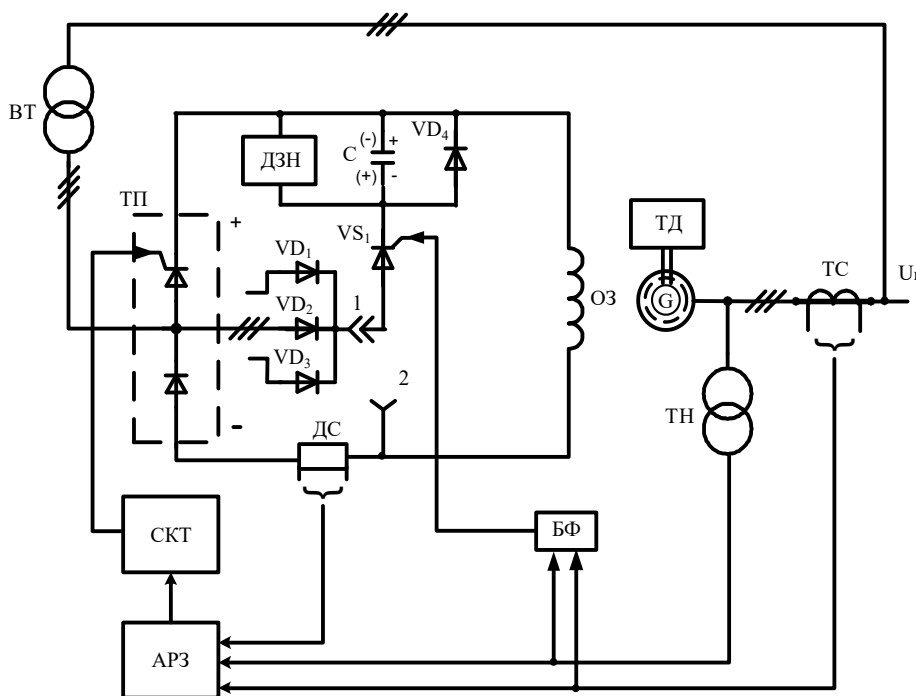


Рисунок 4 – Принципова схема пристрою керування контуром збудження синхронного генератора

Осцилограма режиму форсування збудження при розряді ємності НЕ дозволяє зробити висновок про те, що можна забезпечити або форсування, або гасіння поля синхронного генератора (рис. 5.)

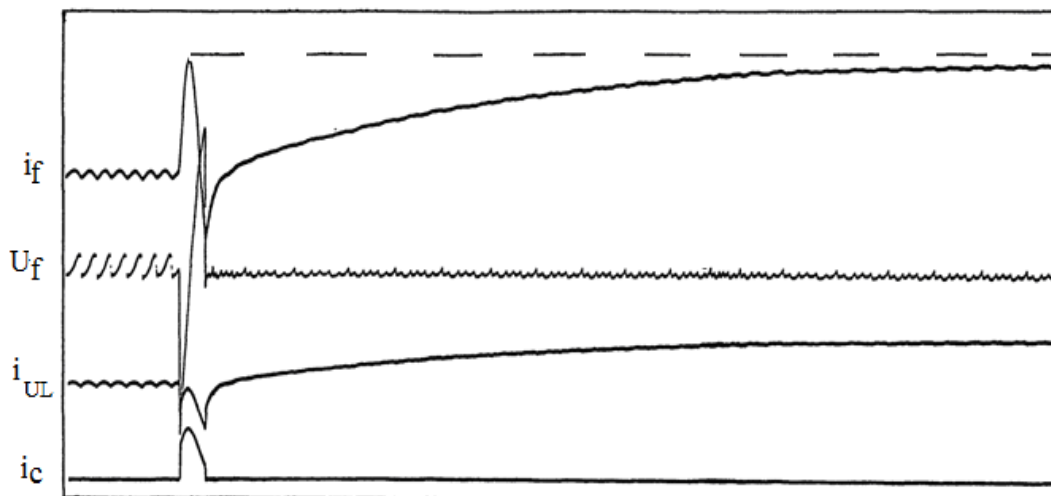
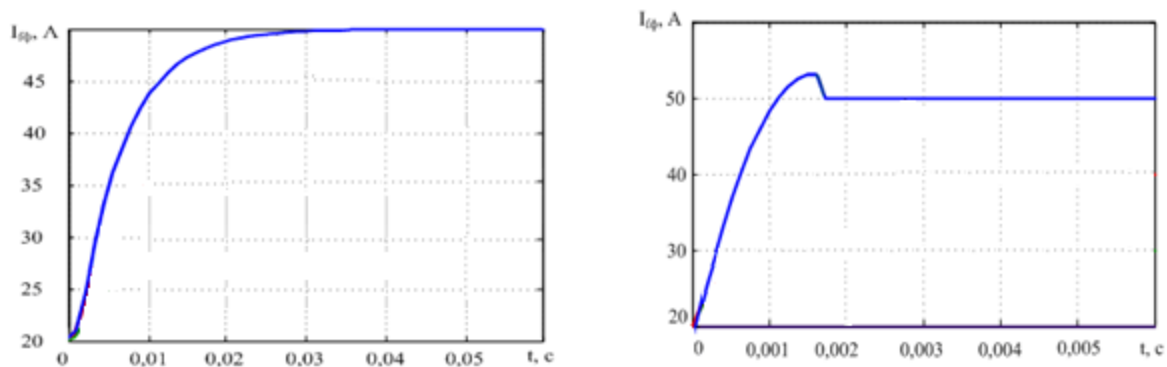


Рисунок 5 – Осцилограма процесу форсування збудження модельного СГ

Результати математичного моделювання режимів форсування струму збудження СГ при кратності форсування напруги $K_i = 2,5$ наведені на рис. 6. На рис. 6,а наведені розрахункові залежності режиму форсування, які характерні для серійних тиристорних збуджувачів з некомпенсованим контуром. На рис. 6,б наведено розрахункові залежності режимів збудження при наявності ємності та початкового струму збудження, що виконані за структурною схемою, наведеною на рис.3.



а)б)

Рисунок 6 – Розрахункові залежності режимів форсування напруги збудження СГ:
а) некомпенсованого контуру; б) компенсованого контуру

Аналіз отриманих залежностей показує, що при некомпенсованому контурі з кратністю форсування $K_i = 2,5$ максимальне значення струму збудження 50,0 А досягається за час 0,04 с, а при компенсованому значення струму 52,2 А досягається лише за час 0,0015 с.

Для врахування впливу контурів СГ виконано розрахунки режимів форсування напруги збудження по повній системі диференціальних рівнянь у в.о. системи $x_{ад}$. Результати розрахунків наведені на рис.7. На рис.7, а,б представлені розрахункові залежності режиму форсування напруги СГ при накиді ударного навантаження з ЄНЕ контуру збудження і без ЄНЕ.

Порівняльний аналіз розрахункових залежностей показує, що швидкодія форсування струму збудження з ЄНЕ в ОЗ значно вища, ніж в серійних тиристорних збуджувачах. Форсувальний режим збудження викликає підвищення сплеску струму статора, електромагнітного моменту і гойдання ротора. Розрахункові залежності струму збудження підтверджують аналітичні залежності (7, а) і (7, б).

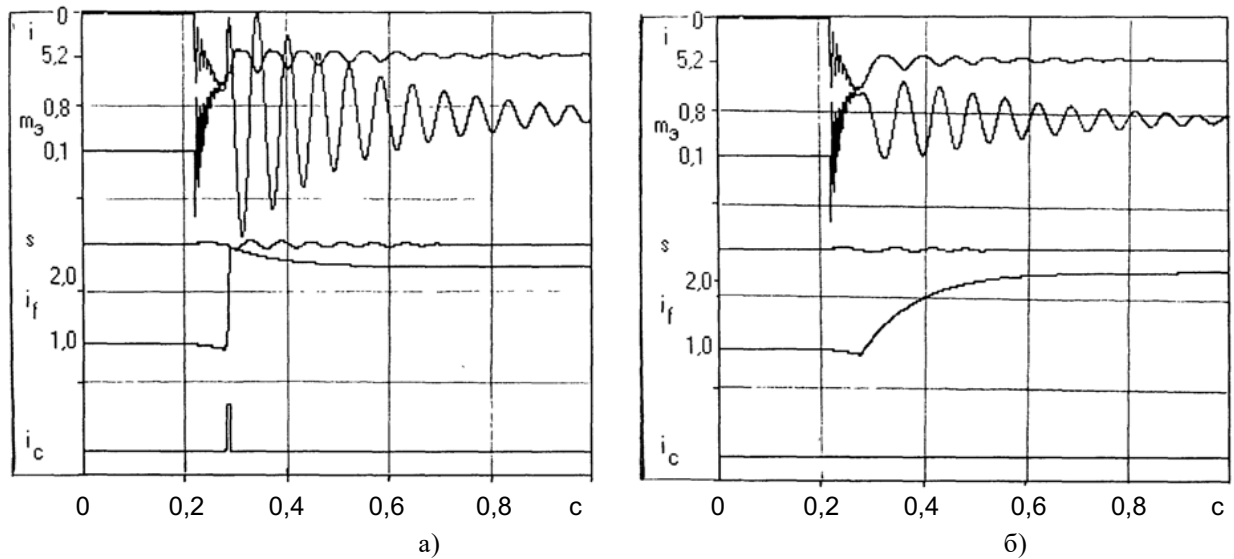


Рисунок 7 – Розрахункові залежності режиму форсування збудження СГ при нахилі навантаження $M_c=0,8$ в.о.: а) з НЕ в ОЗ; б) без НЕ в ОЗ

Для підтвердження теоретичних положень проводилися експериментальні дослідження синхронного генератора в режимі форсування збудження з розробленим пристроєм і з серійними тиристорними збуджувачами. На рис. 8, а приведена осцилограма режиму форсування збудження при ємнісному накопичувачі енергії, а на рис. 8, б - осцилограма форсування напруги, характерна для серійних збуджувачів.

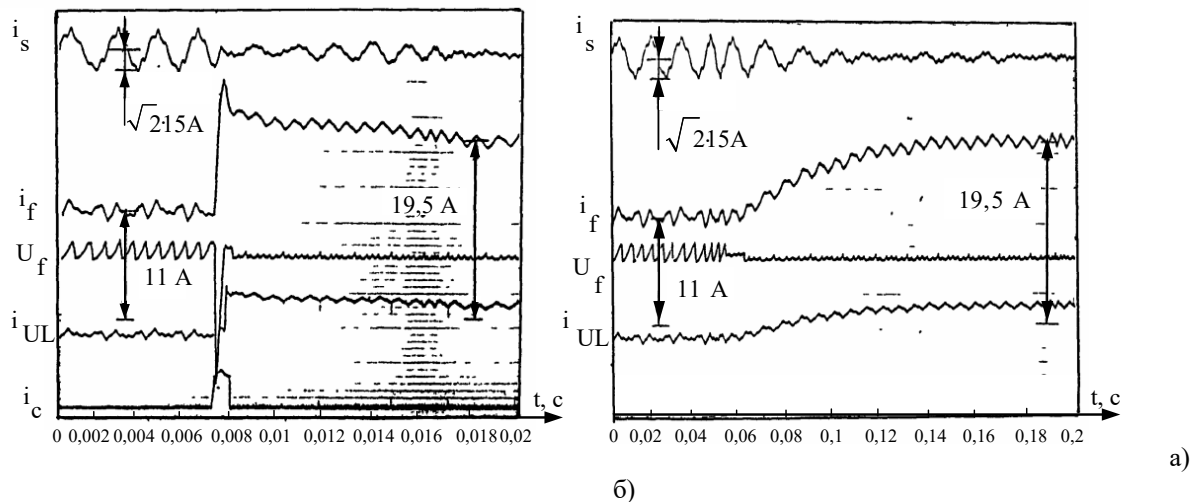


Рисунок 8 – Осцилограми режимів форсування струму збудження в запропонованому (а) і в існуючому збуджувачах (б)

Аналіз осцилограм (рис. 8, а і б) показує, що час досягнення струмом збудження форсировочного значення складає відповідно до 0,008 і 0,16 с. Таким чином, при одній і тій же кратності найбільшої напруги збуджувача швидкодія даного пристрою в режимі форсування збудження приблизно в 20 разів вища, ніж традиційних систем збудження.

Доцільність застосування несиметричних збуджувачів пояснюється тим, що енергетичні показники мостових збуджувачів в номінальних режимах роботи, які характеризуються споживанням реактивної потужності: симетричної – $Q_{fn} = 1,433U_m I_{fn}$, несиметричної – $Q_{fn} = 0,827U_m I_{fn}$, коефіцієнт потужності – $\chi_{м.с.} = 0,477$, $\chi_{м.н.} = 0,552$ [5].

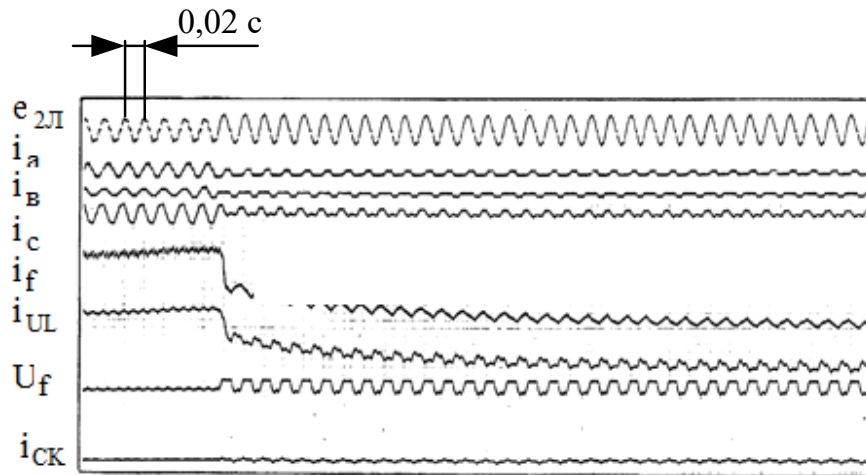
Таким чином доведено, що при рівних значеннях діапазону регулювання симетричні мостові збуджувачі СГ у порівнянні з несиметричними мають значне зниження коефіцієнта потужності на 13,59 % і зростання споживання реактивної потужності на 42,29 %.

Особливістю роботи трифазної мостової несиметричної схеми при активно-індуктивному навантаженні у діапазоні регулювання ($\pi/3 \leq \alpha \leq \pi$) є те, що при знятті сигналу керування не вдається

забезпечити вимикання усіх тиристорів. При знятті сигналу керування здійснюється вимикання двох тиристорів, а третій залишається увімкненим за рахунок ЕРС самоіндукції і через нього протікає струм навантаження. Це призводить до зниження діапазону регулювання напруги і погіршенню використання вентилів за струмом.

Для підвищення ефективності в схему вводять нульовий вентиль, що шунтує навантаження, через який розряджається індуктивність обмотки збудження.

Осцилограма подібного режиму збудження синхронного генератора з несиметричним збуджувачем і відключеному ємнісним накопичувачем енергії приведена на рис. 9.



i_a, i_b, i_c – струми вторинної обмотки трансформатора збуджувача, $e_{2л}$ – електрорушійна сила вторинної обмотки трансформатора збуджувача, i_f – струм збудження, i_{UL} – струм збуджувача, U_f – напруга збудження, $i_{СК}$ – струм розряду ємності,

Рисунок 9 – Осцилограма режиму збудження СГ при знятті керуючих імпульсів з тиристорів несиметричного збуджувача

На рис.10 наведена осцилограма режиму збудження при вимиканні збуджувача сильно струмовим апаратом. На рис.11 наведена осцилограма режиму збудження СГ з СНЕ із зворотним розрядом перезарядженої ємності.

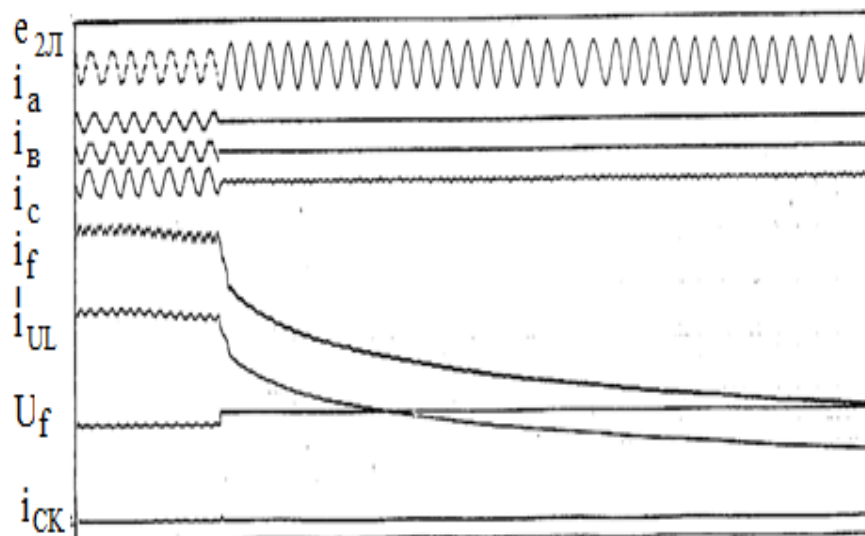


Рисунок 10 – Осцилограма режиму збудження при вимиканні збуджувача сильно струмовим апаратом

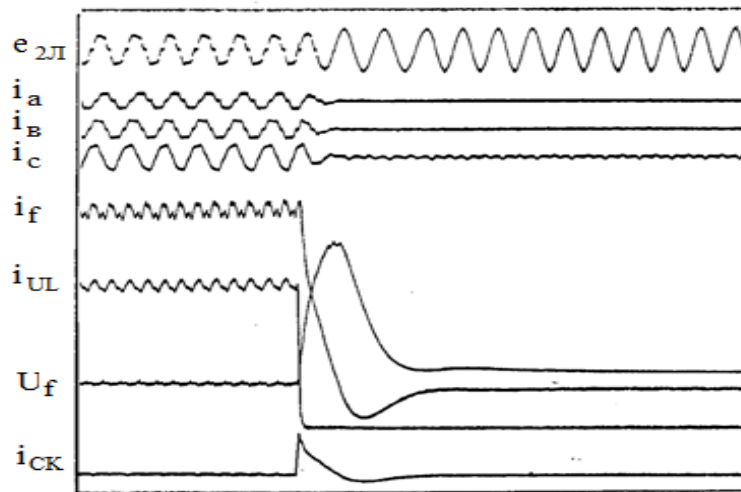


Рисунок 11 – Осцилограма режиму збудження СГ з СНЕ із зворотним розрядом перезарядженої ємності

Для коректності експерименту режимів збудження перетворювач живився від незалежного джерела напруги частотою 50 Гц. Таким чином застосування СНЕ в контурі збудження та керування останнім забезпечує стабільність роботи автономного генератора, а також вимикання тиристорів збуджувача з одночасним гасінням поля. Зворотний розряд СНЕ забезпечує подавлення поля заспокійливої обмотки.

Висновки

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження особливості режиму збудження синхронного генератора, які дозволяють зробити наступні висновки:

1. Швидкодія режиму форсування струму збудження з використанням несиметричного збуджувача з СНЕ на порядок вища порівняно з несиметричним без СНЕ.
2. Несиметричні мостові збуджувачі дозволяють підвищити коефіцієнт потужності на 13 % та зменшити споживання реактивної потужності до 40 % в режимі номінального збудження в порівнянні з симетричними.
3. Схеми з примусовою ємнісною комутацією дозволяють надійно вимикати збуджувач у випадку пошкодження елементів останнього.

Список використаної літератури

1. А.с.№ 1312715 СССР. МКИ Н 02 Р 9/12, 9/14. Устройство для управления возбуждением синхронной машины/ В.Б.Низимов и С.В.Колычев (СССР).-№ 3965507/24-07; Заявлено 21.10.85; Опубл. 23.05.87, Бюл. № 19. - 3с.
2. А.с. № 1599961 СССР. МКИ Н 02 Р 1/50, 9/12.Устройство для возбуждения синхронного электродвигателя/ В.Б.Низимов (СССР). - № 4624878/24-07; Заявлено18.10.88; Опубл. 15.10.90, Бюл. № 38. - 3с.
3. Fick, P. D. Accurate digital current control of the reluctance synchronous machine with constant current angle [Text] / P. D. Fick, M. J. Kamper // Trans. SA Inst. Electr. Eng. – 2004. – Vol. 95, Issue 1. – P. 47–50.
4. Bansal R. C. Three-Phase Self-Excited Induction Generators : An Overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005. vol. 20, Issue 2. Pp. 292–299.
5. Нізімов В.Б., Нізімов Р.В., Сторожко В.С. Спосіб форсування струму збудження синхронного двигуна та пристрій для його реалізації.– Патент 60652 (Україна). Заявлено 24.01.2003р. Надруковано 15.10.2003. Бюл.№10. - 10с.
6. Хоменко В.І. Підвищення стійкості роботи синхронної машини шляхом удосконалення системи збудження / В.І.Хоменко, В.Б. Нізімов, С.В. Количев. – Харків; Східно-Європейський журнал передових технологій «Енергосберегающие технологии и оборудование», 2015. 1/8(73). ISSN 1729-3774/ – С.31– 36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36498
7. Kyriakides, E. On-line estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004. – Vol. 19, Issue 4. Pp. 499–507.
8. A. Benigni and A. Monti, "A Parallel Approach to Real-Time Simulation of Power Electronics Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 5192-5206, Sept. 2015.

9. Kutsyk A. An application of fuzzy voltage regulator to a static excitation system of a phase compound synchronous generator / A. Kutsyk, M. Semeniuk, O. Kuznyetsov // *Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, 2017 - Pp. 46-49.

10. Хоменко В.І. Техніко-енергетичні показники автономної системи електроживлення на базі синхронного генератора / В.І. Хоменко, В.Б. Нізімов. – *Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej NaukowoPraktycznej "Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016"* (30.12.2016) - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. ISBN: 978-83-65608-33-8/ – С. 66–70.

V. Khomenko, Cand. Sc. (Eng), lecturer, **ORCID** 0000-0003-0722-2573
V. Nizimov, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-4580-5262
Prydniprovsky State Metallurgical College, Kamianske
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

FEATURES OF EXCITEMENT MODES OF THE AUTONOMOUS SYNCHRONOUS GENERATOR AT SIGNIFICANT DISTURBANCES

Reliability improvement of power supply of consumers' comparable power from the autonomous generating unit in dynamic modes of power surge of the comparative load due to the acceleration of excitation with the use of capacitive energy storage devices and the establishment of the laws and dependencies of their influence on the modes of operation of synchronous generators. The influence of energy storage system in the circuit of a synchronous generator excitation on increasing the life activities of autonomous generating unit has been researched. An algorithm for controlling the excitation circuit of an autonomous generating unit is proposed and substantiated, taking into account the change of the power circuit and the inclusion of capacitive elements in the inertial circuit. The influence of capacitive energy storage in the excitation circuit of synchronous generator on the process of voltage output regulation of autonomous generating unit by means of consumer comparable capacity connection has been investigated is substantiated. The brought mathematical models and algorithm of control over to the contour of excitation. In order to analyze the energy saving measures, the influence of parameters to the contour of excitation on energy exchange processes between the contours of synchronous generator has been considered. A significant improvement in energy performance can be achieved by using asymmetric bridge exciters, which not only reduce reactive power consumption, but also greatly simplify the power converter by replacing the anode or cathode group of controlled valves with diodes, while halving control channels. Calculation and experimental researches proved that the contour parameters of excitation substantially influence on firmness of synchronous generator and initial voltage stabilization. It has been proved that at the same multiplicity of the highest voltage of the exciter, the speed of this device in the mode of forcing the excitation is approximately 20 times higher than traditional excitation systems. In this case, the circuit with forced capacitive switching allows you to reliably turn off the exciter in case of the elements damage of the latter.

Keywords: autonomous generating unit, the excitation mode, dynamic stability.

REFERENCES

1. А. с. № 1312715 USSR N 02 P 9/12, 9/14. Ustroystvo dlia upravleniya vozbuзhdeniem sinkhronnoy mashyny / V.B. Nizimov i S.V. Kolychev (USSR). - № 3965507/24-07; Zaiavleno 21.10.85; Opubl. 23.05.87, Biul. № 19. – 3с.
2. А. с. № 1599961 USSR N 02 P 1/50, 9/14. Ustroystvo dlia vozbuзhdeniya sinkhronnogo elektrodvigateelia / V.B. Nizimov (USSR). - № 4624878/24-07; Zaiavleno 18.10.88; Opubl. 15.10.90, Biul. № 38. – 3с.
3. Fick, P. D. Accurate digital current control of the reluctance synchronous machine with constant current angle [Text] / P. D. Fick, M. J. Kamper // *Trans. SA Inst. Electr. Eng.* – 2004. – Vol. 95, Issue 1. – P. 47–50.
4. Bansal R. C. Three-Phase Self-Excited Induction Generators : An Overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005. vol. 20, Issue 2. Pp. 292–299.
5. Nizimov V.B., Nizimov R.V. Storozhko V.S. Sposib forsuvannia strumu zbudzhennia synkhronnoho dvyhuna ta prystryi dlsa yoho realizatsii – Patent 60652 (Ukraina). Zaiavleno 24.04.2003 r. Nadrukovano 15.10.2003. Biul. № 10. – 10с.
6. Khomenko V.I. Pidvyshchennia stiykosti roboty synkhronnoi mashyny shlsahom udoskonalennia sustemu zbudzhennia / V.I. Khomenko, V.B. Nizimov, S.V. Kolychev. – Kharkiv; *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy "Enerhosberehayushchye tekhnolohii i oborudovanie"*, 2015. Issue № 1/8 (73). ISSN 1729-3774/ – pp. 31–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36498.
7. Kyriakides, E. On-line estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004. – Vol. 19, Issue 4. Pp. 499–507.

8. A. Benigni and A. Monti, "A Parallel Approach to Real-Time Simulation of Power Electronics Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 9, pp. 5192-5206, Sept. 2015.

9. Kutsyk A. An application of fuzzy voltage regulator to a static excitation system of a phase compound synchronous generator / A. Kutsyk, M. Semeniuk, O. Kuznyetsov //Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 2017 - PP. 46-49.

10. Khomenko V.I. Tekhniko-enerhetichni pokazniki avtonomnoi sistemu elektrozhuvlennia na bazi synkhronnoho generatora / V.I. Khomenko, V.B. Nizimov. - Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej NaukowoPraktycznej " Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016" (30.12.2016) - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. ISBN: 978-83-65608-33-8/ – pp. 66–70.

УДК 621.313.322

В.И. Хоменко, канд. техн. наук, преподаватель высшей категории, ORCID 0000-0003-0722-2573

В.Б. Низимов, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

Приднепровский государственный металлургический колледж, г. Каменское

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Повышение надежности питания потребителей сопоставимой мощности от автономной генерирующей установки в динамических режимах наброса сопоставимой нагрузки достигается за счет форсирования возбуждения с применением емкостных накопителей энергии и установления закономерностей и зависимостей их влияния на режимы работы синхронных генераторов. Исследовано влияние емкостного накопителя энергии в контуре возбуждения синхронного генератора на повышение устойчивости работы автономной генерирующей установки. Предложен и обоснован алгоритм управления контуром возбуждения генерирующей установки, с учетом изменения силовой схемы и включения емкостных элементов в инерционный контур.

Исследованиями доказано, что параметры контура возбуждения существенно влияют на стойкость синхронного генератора и стабилизацию выходящего напряжения. Доказано, что при одной и той же кратности наибольшего напряжения возбудителя быстрдействие данного устройства в режиме форсирования возбуждения приблизительно в 20 раз выше, чем традиционных систем возбуждения. Исследованиями установлено, что схема с принудительной емкостной коммутацией позволяет надежно отключать возбудитель в случае повреждения элементов последнего.

Ключевые слова: автономная генерирующая установка, режим возбуждения, динамическая стойкость.

Надійшла 29.06.2020

Received 29.06.2020