

УДК 621.313.322

В.Б. Нізімов, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262
Дніпровський державний технічний університет, м Кам'янське
В.І. Хоменко, канд. техн. наук, викладач вищої категорії, ORCID 0000-0003-0722-2573
Придніпровський державний металургійний коледж, м Кам'янське

ТЕХНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

Покращення енергетичних показників збуджувачів вмиканням нульових діодів та конденсаторів призводить до суттєвої зміни гармонічного складу напруги збудження. В роботі проведено дослідження гармонічного складу напруги збудження синхронних генераторів (СГ) із несиметричними мостовими збуджувачами із застосуванням вузлів примусової ємнісної комутації. Результати зробленого спектрального аналізу свідчать про те, що напруга збудження при номінальному режимі роботи генератора містить значну третю гармоніку, яка складає 66 відсотків від амплітуди першої гармоніки. Значна величина третьої гармоніки обумовлена великими кутами керування тиристорами збуджувача в номінальному режимі роботи синхронного генератора. Через значну третю гармоніку вторинна обмотка випрямного трансформатора повинна бути з'єднана у трикутник. Присутність парних гармонік викликана несиметрією напруги по відношенню до осі абсцис. Виконано дослідження режимів гасіння поля при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора СГ з використанням вузлів примусової ємнісної комутації. Наведено розрахункові залежності та експериментальні режими процесів гасіння поля СГ.

Ключові слова: автономна генеруюча установка, синхронний генератор, вузли примусової ємнісної комутації.

Вступ

Основним режимом роботи синхронних генераторів автономних генеруючих установок (АГУ) є режим близький до номінального. Однак, при підключенні до АГУ споживачів співставної потужності, для стабілізації вихідної напруги генератора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження впливом на кути керування тиристорами збуджувача. Оскільки коефіцієнт форсування за напругою лежить в межах 3...5 відносних одиниць (в.о.) в залежності від потужності СГ, це призводить до значних кутів керування тиристорами збуджувача в номінальному режимі та викликає споживання значної реактивної потужності збуджувачем і зниження енергетичних показників.

Для підвищення енергетичних показників мостових збуджувачів, особливо несиметричних, застосовують конденсатори в силових колах збуджувального трансформатора [1], або використовують два нульових діоди, які з'єднані послідовно і підключені до виходу збуджувача. Загальна їх точка підключена через конденсатор до нуля живильного трансформатора [2]. Суттєве покращення енергетичних показників може бути отримане з використанням вузлів примусової ємнісної комутації [3].

Однак, покращення енергетичних показників вмиканням нульових діодів, конденсаторів та вузлів примусової комутації призводить до суттєвої зміни гармонічного складу напруги збудження.

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 необхідне форсоване гасіння поля. Форсоване гасіння поля може бути виконано з вмиканням розрядного резистора автоматом гасіння поля (АГП), переведенням збуджувача в режим інвертування або застосуванням імпульсно-дугових комутаторів. Використання АГП в тиристорних системах збудження є недоцільним через можливість виникнення перенапруг, а режим інвертування збуджувача принципово є неможливим при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора синхронного генератора. Характерною рисою несиметричних збуджувачів є те, що при знятті керуючих імпульсів останні продовжують жити обмотку збудження. Тому форсування гасіння поля у випадку короткого замикання може бути забезпечено вузлом примусової ємнісної комутації.

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження впливу вузла примусової ємнісної комутації на гармонічний склад напруги збудження та режимів гасіння поля при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора СГ.

Результати досліджень

Експериментальне дослідження енергетичних показників виконано для несиметричних мостових збуджувачів із застосуванням вузлів примусової ємнісної комутації [3]. При цьому не розглянуто вплив вузлів примусової ємнісної комутації на гармонічну складову напруги збудження та не визначено можливі режими гасіння поля при внутрішніх КЗ обмоток статора СГ.

© В.Б. Нізімов, В.І. Хоменко, 2019

Принципова схема дослідженої системи збудження наведена на рис.1.

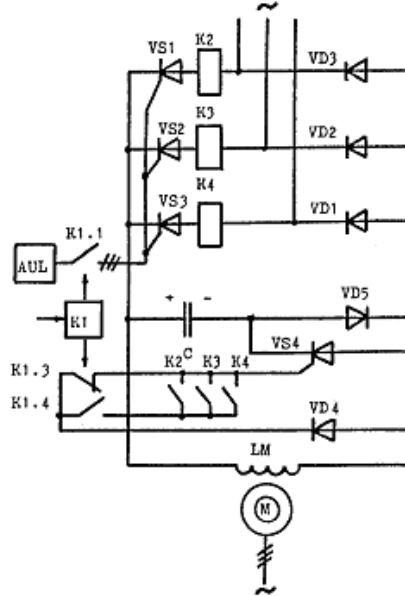
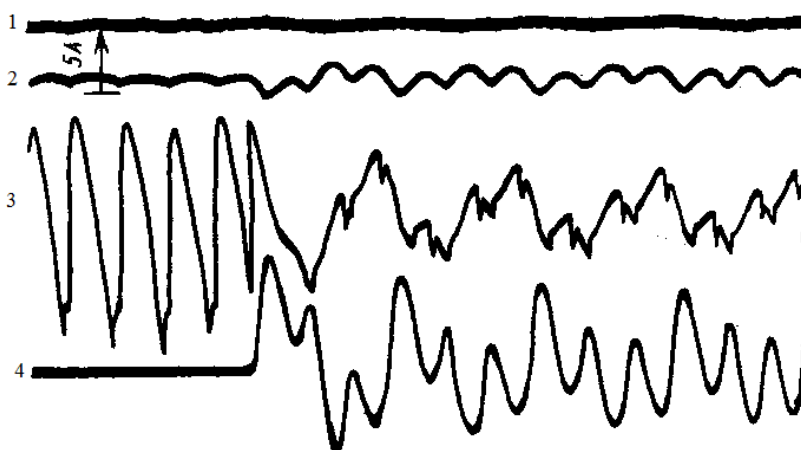


Рисунок 1 – Принципова схема несиметричного мостового збуджувача з примусовою ємнісною комутацією

При несиметричному збуджувачі керуючі сигнали на тиристри катодної групи подаються від блоку імпульсно-фазового керування AUL через ключ K1.1.

Під час комутації тиристорів катодної групи тиристорного збуджувача (ТЗ) по черзі спрацьовують герконові реле K2, K3, K4. Своїми ключами вони замикають коло керування комутуючим тиристором VS4 і послідовно через ключ K1.4 діод VD4 підмикає її до обмотки збудження LM, яка в цій схемі є автономним джерелом енергії. Якщо миттєве значення електрорушійної сили (е.р.с.) ТЗ стає менше, ніж напруга конденсатора С, то вмикається комутуючий тиристор VS4, і конденсатор С розряджається на ОЗ LM, що призводить до зменшення пульсацій напруги на обмотці збудження. Якщо ж миттєве значення е.р.с. ТЗ вище, ніж початкова напруга на конденсаторі С, то останній заряджається. При негативному значенні миттєвої е.р.с. ТЗ, що зазвичай має місце в режимі номінального збудження СГ, накопичена в індуктивності ОЗ LM електромагнітна енергія виводиться по контуру: ОЗ LM – комутуючий тиристор VS4 – конденсатор С – ОЗ LM, а не повертається в мережу, зменшуючи тим самим встановлену потужність збуджувального трансформатора.

Для дослідження гармонічного ряду використовується експериментально отримана крива напруги збудження [3], яка розкладається в ряд Фур'є (рис.2).



1 – струм обмотки збудження; 2 – струм мостового ТЗ;
3 – е.р.с. мостового ТЗ; 4 – струм комутуючого конденсатора

Рисунок 2 – Осцилограма номінального збудження СГ при підключенні вузла примусової ємнісної комутації

Вираз для напруги $u(t)$ представлений рядом Фур'є

$$u(t) = U_0 + \sum_{\nu=1}^n U_{\nu m} \sin(\nu \omega t + \psi_{\nu}), \quad (1)$$

де U_0 – постійна складова; $U_{\nu m} \sin(\nu \omega t + \psi_{\nu})$ – гармоніки ν -го порядку з амплітудою $U_{\nu m}$ і початковою фазою ψ_{ν} ; n – порядок (номер) останньої з вищих гармонік, що враховуються.

Амплітуди і початкові фази гармонік можуть бути знайдені через ортогональні проекції $U_{\nu a}$ і $U_{\nu p}$:

$$U_{\nu m} = \sqrt{U_{\nu a}^2 + U_{\nu p}^2}. \quad (2)$$

Крива напруги, яка експериментально отримана, наведена на рис. 3.

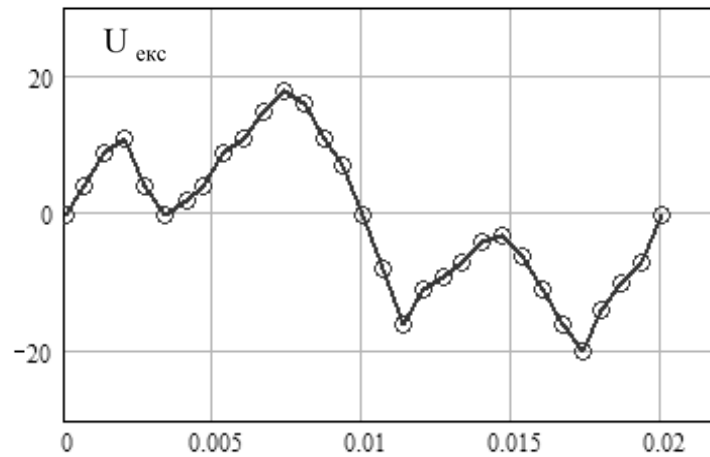


Рисунок 3 – Експериментальна крива напруги збудження СГ

При розкладанні в ряд Фур'є враховані 15 гармонік. Гармонійний склад напруги збудження наведений на рис. 4. Причому є присутніми як парні, так і непарні гармоніки, оскільки напівперіоди початкової кривої на рис. 3 несиметричні по відношенню один до одного.

$$(U_{\nu m} / U_{1m}) \cdot 100\%$$

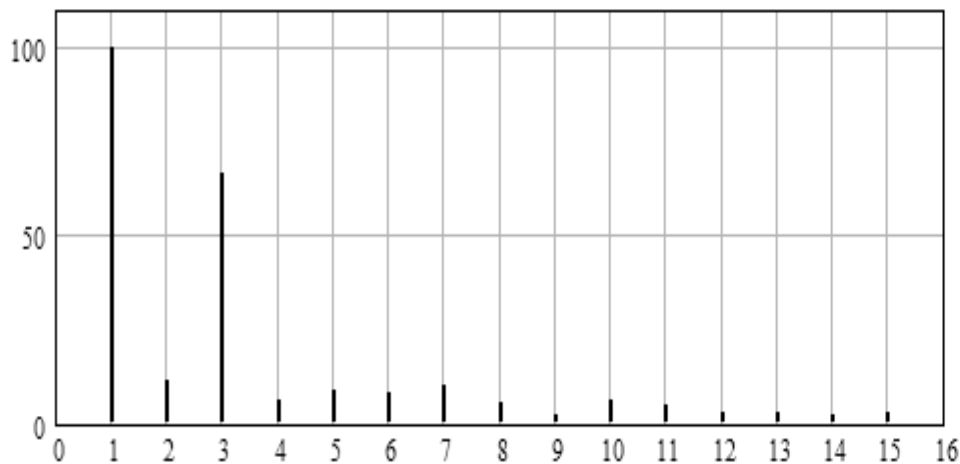


Рисунок 4 – Амплітудний спектр напруги збудження СГ

Після обчислень сума п'ятнадцяти гармонік ряду прийме вигляд:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & 11,89 \sin(\omega t - 12,7^\circ) + 1,33 \sin(2\omega t - 166,4^\circ) + 7,89 \sin(3\omega t + 31,5^\circ) + \\
 & + 0,74 \sin(4\omega t + 108,3^\circ) + 1,02 \sin(5\omega t - 72,2^\circ) + 0,97 \sin(6\omega t - 121,01^\circ) + \\
 & + 1,24 \sin(7\omega t - 96,7^\circ) + 0,68 \sin(8\omega t + 116,4^\circ) + 0,29 \sin(9\omega t - 58,9^\circ) + \\
 & + 0,77 \sin(10\omega t + 64,2^\circ) + 0,57 \sin(11\omega t + 92,6^\circ) + 0,36 \sin(12\omega t + 23,2^\circ) + \\
 & + 0,37 \sin(13\omega t + 142,7^\circ) + 0,286 \sin(14\omega t - 107,6^\circ) + 0,32 \sin(15\omega t + 78,1^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

У координатних осях побудований графік за даними експериментальної кривої (рис. 3) та розрахований за виразом (3). Результати побудови показані на рис. 5, які підтверджують якість апроксимації.

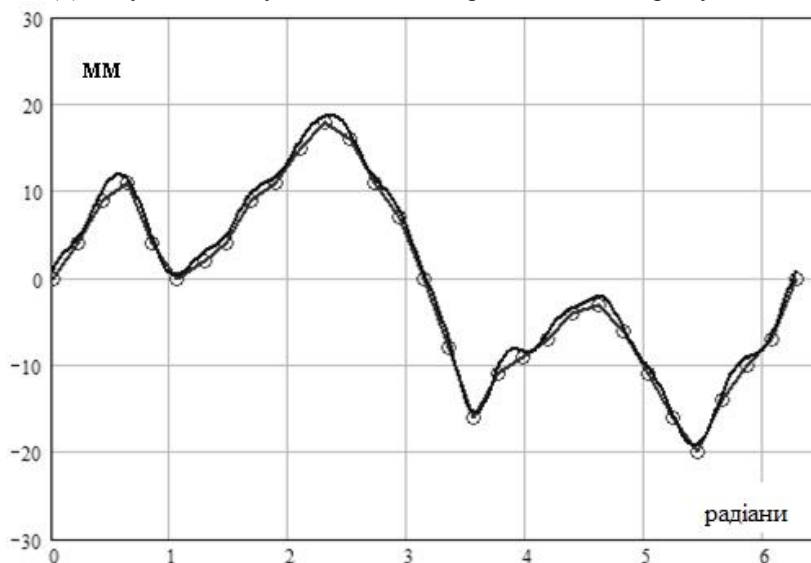


Рисунок 5 – Експериментальна крива напруги та її апроксимація п'ятнадцятьма гармоніками тригонометричного ряду

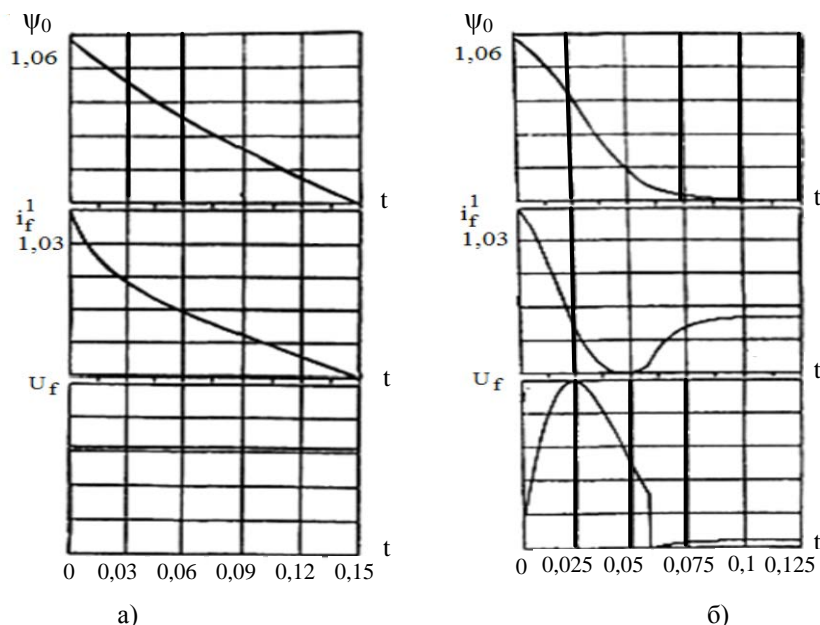
Форсоване гасіння магнітного поля СГ здійснюється наступним чином. Блоком К1 за сигналом максимально-струмового або нульового захистів (впливають також на комутаційний вимикач статора) розмикається ключ К1.4, а потім з витримкою часу, відповідно 1 ... 3 періодам живлячої напруги, знімаються керуючі сигнали з ТЗ ключами К1.1 і К1.2 і замикається ключем К1.3. При повному зникненні живлення збуджувального трансформатора напруга на ЄНЕ буде вище е.р.с. ТЗ, а при частковій посадці напруги мережі згаданий конденсатор С за 1 ... 3 періоди живлячої напруги зарядиться через діод VD5 до максимального значення миттєвої е.р.с. ТЗ. Ключ К1.3 замикаючись вмикає тиристор VS4 через діод VD4 від е.р.с. обмотки збудження. Далі попередньо заряджений конденсатор С вмикає тиристри ТЗ та розряджається у контурі, утвореному плюсовою обкладкою конденсатора С – ОЗ LM – тиристор VS4 – мінусовою обкладкою конденсатора С. Тиристор VS4 вмикається в момент досягнення струмом нульового значення, після чого перезаряджений у процесі гасіння поля конденсатор С розряджається на ОЗ LM через діод VD5, змінюючи напрямок струму в останній.

Енергетика розробленої схеми була досліджена експериментально на синхронній машині типу ЕСС-52 – 4У2, потужністю 5 кВт, 1500 об/хв. В якості статичного збуджувача застосовувався серійний тиристорний перетворювач типу ВУК-50/500 з живленням силового мосту від узгоджувального трансформатора 1,5 кВА, 220/20 В. Функції комутуючої ємності виконував конденсаторний фільтр ФСТ – 0,75–300У2, 300 мкФ, 0,75 кВ. Енергетичні показники збуджувачів розраховувалися на підставі експериментальних даних для номінального і форсованого збудження СГ у відповідності з методикою, наведеною в [4].

Для порівняльної оцінки різних пристроїв збудження отримані розрахункові залежності режиму гасіння поля СГ для таких даних: момент статичного опору $m = 0,1$ в.о.; $K_u = 1,7$; $C = 250$ мкФ (рис. 6).

Аналіз розрахункових залежностей показує, що найбільш інтенсивне гасіння поля СГ відбувається при включенні електричної ємності в ОЗ.

З метою підтвердження основних теоретичних положень були проведені експериментальні дослідження модельного СГ.



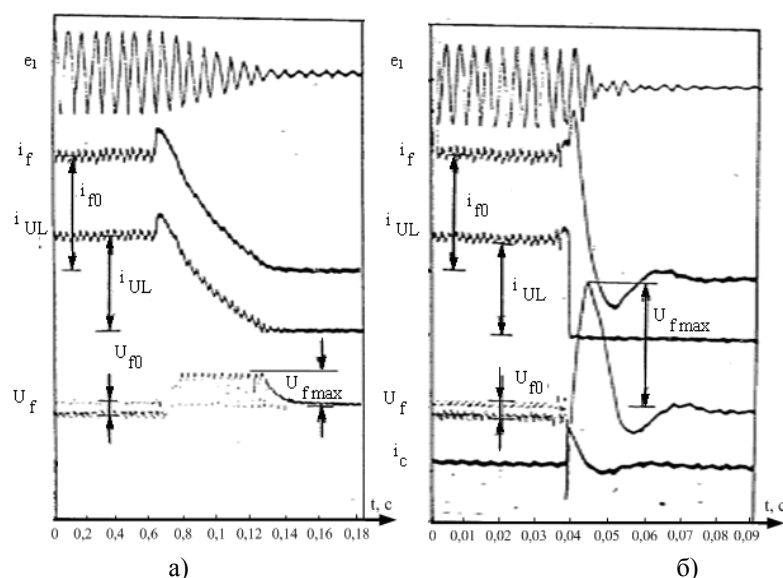
а) при інвертуванні збуджувача, $K_u=1,7$; б) при вмиканні в ОЗ з електричною ємністю $K_c=8,3$

Рисунок 6 – Розрахункові залежності процесів гасіння поля модельного СГ

На рис. 7, а наведена осцилограма процесу гасіння поля СГ при переводі збуджувача в режим інвертування з форсуванням напруги рівної $K_u=2,2$. Час досягнення струмом збудження нульового значення склав 0,154 с.

На рис. 7, б наведена осцилограма процесу гасіння поля СГ з електричною ємністю і зворотним розрядом перезарядженої останньої у процесі гасіння поля. Кратність максимального значення перехідної напруги на обмотці збудження склала $K_u=8,0$. Час досягнення струмом збудження нульового значення склав 0,05 с.

Таким чином, найбільш ефективним є пристрій з вузлом примусової ємнісної комутації, що забезпечує високу швидкість режиму гасіння поля при відносно низькому рівні перенапруг на обмотці збудження синхронного генератора, незалежно від наявності та величини напруги живлення збуджувача.



а) при інвертуванні збуджувача при живленні останнього від незалежного джерела;
б) при використанні вузла примусової ємнісної комутації

Рисунок 7 - Осцилограми процесу гасіння поля СГ

Висновки

1. Результати розкладання в ряд Фур'є напруги збудження мостового несиметричного збуджувача синхронного генератора свідчать, що третя гармоніка складає 66% від амплітуди першої гармоніки. Значна величина третьої гармоніки обумовлена великим кутом керування тиристорами збуджувача при номінальному режимі роботи синхронного генератора. Через значну третю гармоніку вторинна обмотка випрямного трансформатора повинна бути з'єднана у трикутник. Несиметрія напруги збудження по відношенню до осі абсцис викликає присутність парних гармонік.

2. Найбільш ефективним режимом гасіння поля при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора є пристрій з використанням вузлів примусової ємнісної комутації.

Список літератури

1. Баев А.В. Вентильные преобразователи с конденсаторами в силовых цепях / А.В., Баев, Ю.К. Волков, В.П. Долинин, В.Я. Корнеев. – М.: Энергия, 1969. – 236 с.
2. Кашкалов В.И. Улучшение энергетических показателей управляемых вентилях / В.И. Кашкалов, Б.И. Половинкин. – К.: Техника, 1988. – 159 с.
3. Низимов В.Б. Влияние принудительной емкостной коммутации на энергетические показатели мостовых возбудителей / В.Б. Низимов, С.В. Колычев, П.С. Розумный // *Электротехника*, 1990, №4.
4. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

V. Nizimov, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-4580-5262

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

V. Khomenko, Cand. Sc. (Eng), lecturer, ORCID 0000-0003-0722-2573

Prydniprovsky State Metallurgical College, Kamianske

TECHNICAL AND ENERGY INDICATORS OF MEAN POWER AUTONOMOUS SYNCHRONOUS GENERATOR

The energy performance improving of the exciter by switching on the zero diodes and capacitors leads to a significant change in the harmonic composition of the excitation voltage. The study investigates the harmonic composition of the excitation voltage of synchronous generators with asymmetrical bridge exciters using the units of forced capacitive switching. To determine the harmonic composition of the excitation voltage, we decompose the experimental curve into a Fourier series and expressions for calculating the harmonic components. The results of the spectral analysis indicate that the excitation voltage at the rated mode of the generator contains a significant third harmonic, which is 66 percent of the amplitude of the first harmonic. The significant value of the third harmonic is due to the large angles of control of the exciter thyristor in the nominal mode of operation of the synchronous generator. Due to the significant third harmonic, the secondary winding of the rectifier transformer must be connected to a triangle. The presence of even harmonics is caused by the voltage asymmetry with respect to the abscissa. A non-symmetrical bridge exciter with a forced capacitance switching unit for a synchronous generator has been developed, which provides improved energy performance during its nominal operation. The scheme of control of the bridge asymmetrical exciter of the synchronous generator with the node of forced capacitive switching for the rated mode of operation, as well as in the mode of the field suppression at short circuits of the stator windings has been described. The comparative estimation of the suppression modes of the field at a short circuit of the windings of the generator stator with the possible mode of inverting the exciter and using the node of forced capacitive switching has been carried out. Experimental studies have confirmed the calculated dependences of the modes of the magnetic field suppression. The analysis of experimental dependencies shows that the units of forced capacitive switching provide a higher speed of the field suppression modes, regardless of the presence and magnitude of the supply of voltage the exciter.

Key words: autonomous generating unit, synchronous generator, nodes of forced capacitive switching.

References

1. Baev A.V. Ventil'nye preobrazovateli s kondensatorami v silovykh tsepiakh / A.V. Baev, YU.K. Volkov, V.P. Dolinin, V.YA. Korneyev. – М.: Energiya, 1969. – 236 s.
2. Kashkalov V.I. Ulucheniye energeticheskikh pokazateley upravlyaemykh ventilyey / V.I. Kashkalov, B.I. Polovinkin. – К.: Tekhnika, 1988. – 159 s.
3. Nizimov V.B. Vliyaniye prinuditel'noy emkostnoy kommutatsii na energeticheskiye pokazateli mostovykh vozбудiteley / V.B. Nizimov, S.V. Kolychev, P.S. Rozumnyy // *Elektrotehnika*, 1990, № 4.
4. Maevskiy O.A. Energeticheskie pokazateli ventil'nykh preobrazovateley. – М.: Energiya, 1978. – 320 s.

В.Б. Низимов, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262
Днепропетровский государственный технический университет, г. Камянское
В.И. Хоменко, канд. техн. наук, преподаватель высшей категории, ORCID 0000-0003-0722-2573
Приднепровский государственный металлургический колледж, г. Камянское

ТЕХНИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Улучшение энергетических показателей возбудителей включением нулевых диодов и конденсаторов приводит к существенному изменению гармонического состава напряжения возбуждения. В работе проведено исследование гармонического состава напряжения возбуждения синхронных генераторов (СГ) с несимметричными мостовыми возбудителями с применением узлов принудительной емкостной коммутации. Результаты сделанного спектрального анализа свидетельствуют о том, что напряжение возбуждения при номинальном режиме работы генератора содержит значительную третью гармонику, которая составляет 66 процентов от амплитуды первой гармоники. Значительная величина третьей гармоники обусловлена большими углами управления тиристорами возбудителя в номинальном режиме работы синхронного генератора. Через значительную третью гармонику вторичная обмотка выпрямительного трансформатора должна быть соединенная в треугольник. Присутствие парных гармоник вызвано несимметрией напряжения по отношению к оси абсцисс. Выполнено исследование режимов гашения поля при внутренних коротких замыканиях обмоток статора СГ с использованием узлов принудительной емкостной коммутации. Приведены расчетные зависимости и экспериментальные режимы процессов гашения поля СГ.

Ключевые слова: автономная генерирующая установка, синхронный генератор, узлы принудительной емкостной коммутации.

Надійшла 08.10.2019
Received 08.10.2019