

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА З БЕЗКОТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ І КОМУТАТОРОМ ЗА НУЛЬОВОЮ СХЕМОЮ ПІД ЧАС РОБОТИ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

Василів К.М., к.т.н.

Національний лісотехнічний університет України

Кафедра ОТ і МТП, НЛТУУ, вул. Генерала Чупринки, 103, Львів, 79057, Україна

тел. (0322) 37-82-55, (0322) 22-64-03, E-mail: kawas@forest.lviv.ua

Галіновський О.М., к.т.н.

Національний технічний університет України "Ківський політехнічний інститут"

Кафедра електромеханіки, НТУУ "КПІ", пр. Перемоги, 37, Київ, 03056

тел. (044) 258-01-54, E-mail: alga40@mail.ru

Виконано аналіз динамічних електромагнітних процесів автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем і комутатором за нульовою схемою під час роботи на активно-індуктивне навантаження. Встановлено основні закономірності перебігу динамічних електромагнітних процесів залежно від схеми модулятора та параметрів системи керування комутатором.

Выполнен анализ динамических электромагнитных процессов автономной электроэнергетической системы на базе асинхронизированного генератора с бесконтактным каскадным трехфазно-трехфазным модулированным возбудителем и коммутатором по нулевой схеме при работе на активно-индуктивную нагрузку. Установлено основные закономерности протекания динамических электромагнитных процессов в зависимости от схемы модулятора и параметров системы управления коммутатором.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Потужності автономних електроенергетичних систем становлять вагомую долю глобальної системи генерування та споживання електричної енергії, оскільки використання автономних електроенергетичних систем (АЕЕС) достатньо широко практикується як у промисловості, так і на транспортних засобах.

Характерною особливістю АЕЕС є робота генератора у режимі граничних навантажень (з можливими перевантаженнями, спричиненими ймовірними екстремальними ситуаціями), що робить актуальною проблему надійності функціонування генератора. Друга особливість таких систем полягає у істотній нестабільності швидкості обертання рушія, що спричиняє іншу складну проблему – стабілізування частоти напруги.

Аналіз наукової літератури та практичних рішень показують, що ці складні і актуальні проблеми можуть бути ефективно вирішені використанням у АЕЕС асинхронізованих генераторів (АСГ). Впровадження АСГ стало позитивною тенденцією у розвитку електроенергетики загалом та автономної електроенергетики зокрема. Ідея АСГ перебуває у стані постійного еволюційного розвитку. На сьогодні одним із перспективних варіантів створення АСГ є формування системи АСГ на базі безконтактних каскадних модульованих збуджувачів (БКМЗ) [6]. Саме АСГ на базі БКМЗ дають змогу забезпечити високу надійність роботи генератора завдяки безконтактному варіанту виконання та ефективно вирішити іншу важливу проблему стабілізування частоти напруги при змінній швидкості обертання рушія. Проблема стабілізування частоти напруги тут вирішується функціонуванням БКМЗ та-

ким чином, що у контурах збуджувача генератора формуються електричні струми частоти ковзання. Це дає змогу отримати постійну швидкість обертального електромагнітного поля генератора, що, своєю чергою, забезпечує стабільність частоти напруги.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Автори цієї статті протягом останніх років виконали значний обсяг робіт, пов'язаний з розробкою математичних моделей АЕЕС на базі генераторів з БКМЗ, а також у поточному часі виконують дослідження зазначених систем. Так, у [1, 3] розроблено математичні моделі АЕЕС на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним та двофазно-трифазним БКМЗ. У [2, 4] розроблено більш досконалі математичні моделі цих же систем. На відміну від [1] та [3], математичні моделі [2] та [4] дають змогу моделювати динамічні режими, спричинені зміною швидкості обертання рушія. Наявність останніх математичних моделей дає змогу виконувати практично всі без істотних обмежень дослідження роботи АЕЕС на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним та двофазно-трифазним БКМЗ.

Всі ці математичні моделі ефективно використовуються для дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються у АЕЕС даного класу.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

З погляду практичних потреб надто важливою інформацією є дані по поведінці система у характерних режимах роботи. До таких режимів належать режими неробочого ходу та робота на номінальне навантажен-

ня. Певну зацікавленість становить інформація про поведінку системи під час роботи у аварійних режимах. Останні дослідження, які проводилися на предмет аналізу процесів, що відбуваються у АЕЕС з трифазно-трифазним модульованим збуджувачем, стосувалися систем на базі БКМЗ з комутатором за схемою у дві зірки. Так, у [5] опубліковано результати аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються у АЕЕС під час роботи АСГ у режимі неробочого ходу. Важливо зазначити, що у сенсі схемного рішення системи генерування даного класу поділяються на два основні типи: трифазно-трифазні та двофазно-трифазні. А кожен з цих двох типів, у свою чергу, має ряд окремих схем. Крім схеми комутатора у дві зірки можливі ще дві схеми: це схема комутатора у одну зірку та мостова схема. Кожна з таких схем характерна певними особливостями перебігу процесів. З погляду практики важливо виконати дослідження на предмет оптимізації схемного рішення силового електричного кола БКМЗ. Теоретично кожна з можливих схем може бути використана. Тому всі вони мають бути ретельно проаналізовані.

Крім схемного рішення важливим моментом стосовно функціонування систем генерування даного класу є вид навантаження. У подібних системах генерування, як правило, серед споживачів є асинхронні двигуни (АД), які приводять у рух насоси, вентилятори та інші механізми. Прикладом таких систем можна вважати АЕЕС компресорних станцій, які призначені для забезпечення електроенергією для внутрішніх потреб. Висока ймовірність наявності споживачів типу активно-індуктивного навантаження, яке можна розглядати як еквівалентне навантаження досить широкого набору споживачів (нагрівальні пристрої, освітлення і т. ін.). Очевидно, що поведінка АЕЕС під час її роботи на такі різні споживачі може істотно відрізнятися. Аналіз процесів АЕЕС, що відбуваються під час роботи системи на різні види навантажень є предметом окремих досліджень. Отже, враховуючи, що ці процеси на сьогодні ще не вивчені, можна стверджувати, що задачі дослідження процесів АЕЕС на базі БКМЗ з комутатором у одну зірку під час роботи на активно-індуктивне навантаження є актуальною науковою проблемою.

Метою статті є аналіз динамічних електромагнітних процесів АЕЕС на базі АСГ з безконтактним каскадним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем з комутатором зі схемою у одну зірку під час роботи генератора на активно-індуктивне навантаження. Динаміка процесів спричинена двома чинниками: зміною швидкості обертання рушія генератора та перехідними процесами, що виникають внаслідок вмикання та вимикання статичного навантаження. Такий аналіз передбачає вивчення впливу на поведінку АЕЕС схемного рішення силового електричного кола модулятора та деяких параметрів системи керування комутатором (як кут регулювання та вставка за струмом) для режимів роботи, коли активно-індуктивні навантаження вмикаються та вимикаються у довільній комбінації. Одним із важливих питань є аналіз якості електричної енергії для споживачів, де

серед основних параметрів розглядаються частота та гармонічний спектр електричної напруги та струму.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Об'єктом дослідження є АЕЕС на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним БКМЗ, комутатором у якому слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти. Схема силового електричного кола такої АЕЕС зображена на рис. 1.

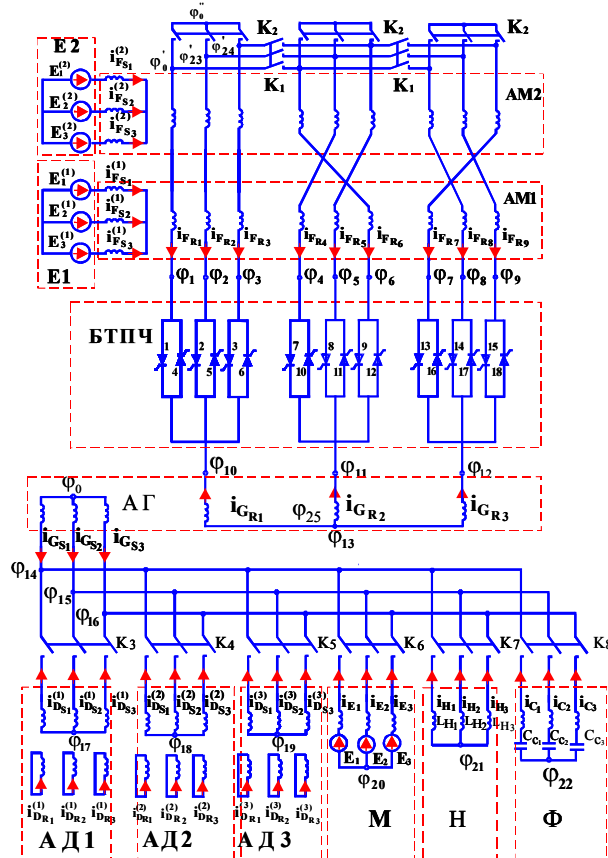


Рис. 1. Схема силового електричного кола АЕЕС

Структурними елементами АЕЕС є: трифазно-трифазний модулятор, що складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розщеплені на три вітки; джерел живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, обмотки ротора якої з'єднані у зірку. До системи входять споживачі: три асинхронні двигуни АД1, АД2, АД3, активно-індуктивне навантаження Н, фільтр Ф, яким слугує батарея конденсаторів. Передбачена можливість роботи АСГ паралельно з трифазною електричною мережею М.

Окрім описаних вище ідентифікаторів структурних елементів АЕЕС, на схемі рис.1 прийняті відповідні позначення електричних величин та інших компонентів схеми. Літерами ϕ , i , E , L , C позначено: потенціали, струми, електрорушійні сили, індуктивності та ємності, а літерою K - ключі схеми. Літерами F , G , D , M , H , C у нижніх індексах відповідно позначено належність величин до модулятора, генератора, асинхронних двигунів, електричної мережі з боку статора генератора, активно-індуктивного навантаження та

фільтра. На схемі та у подальших викладках літерами S , R у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами у нижніх індексах позначено номери електричних віток у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 у нижньому індексі - вузли з нульовим потенціалом. Цифрами у круглих дужках (1) і т.д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2, джерел живлення модулятора Е1 і Е2 та асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3. Кількість штрихів у верхньому індексі відповідає номеру варіанта з'єднань розщеплених віток обмоток ротора АМ2.

У схемі модулятора передбачено два варіанти з'єднання роторних обмоток АМ2. Перший з них забезпечує комбіноване з'єднання ($K_F=1$), коли ключі K_2 розімкнені, а ключі K_1 замкнені. При цьому у схемі з'являються три вузли з потенціалами: $\phi_0, \phi_{23}, \phi_{24}$. У другому варіанті ($K_F=2$) передбачає з'єднання всіх розщеплених віток обмоток ротора АМ2 у один спільний вузол з нульовим потенціалом $\phi_0 = 0$, тобто ключі K_1 та K_2 замкнені. Решта ключі $K_3 \div K_8$ призначені для вмикання та відмикання споживачів. При цьому ключами $K_3 \div K_5$ вмикаються та відмикуються три асинхронні двигуни АД1÷АД3 відповідно, а вимикачами $K_6 \div K_8$ - решта споживачів: електрична мережа, статичне навантаження та фільтр відповідно.

У статті аналізується перебіг електромагнітних процесів АЕЕС у залежності від схеми з'єднання силового кола модулятора, значення ковзання генератора та параметрів системи керування БТПЧ.

Важливо зазначити, що тут розглядається БКМЗ з різною кількістю пар полюсів машин АМ1 та АМ2 ($p_0^{(1)} = 4$ та $p_0^{(2)} = 8$) відповідно, а для генератора $p_{G_0} = 2$.

Дослідження динамічних електромагнітних процесів АЕЕС проведемо для системи на базі АСГ потужністю 100 кВт. Суть дослідження полягає у розрахунку електромагнітних процесів, результатом якого є отримання розрахункових функціональних залежностей від часу миттєвих значень струмів, напруг та деяких інших величин і виконання гармонічного аналізу шляхом розкладання отриманих функцій у ряд Фур'є та подальшого аналізу спектра амплітуд гармонік відповідних величин. Моделювання процесів проведемо для апріорі відомого закону зміни у часі ковзання АСГ ($S = S(t)$). Розрахунки електромагнітних процесів АЕЕС відображені на рис. 2÷21. На рис. 2 відображено розрахункову залежність ковзання генератора від часу.



Рис. 2. S – ковзання генератора

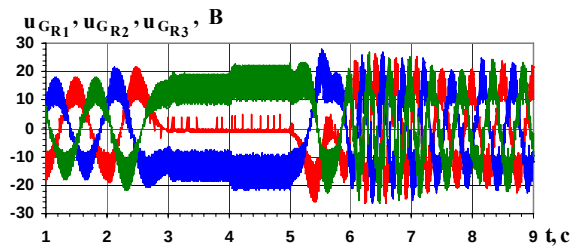


Рис. 3. $u_{GR1}, u_{GR2}, u_{GR3}$ - фазні напруги ротора генератора

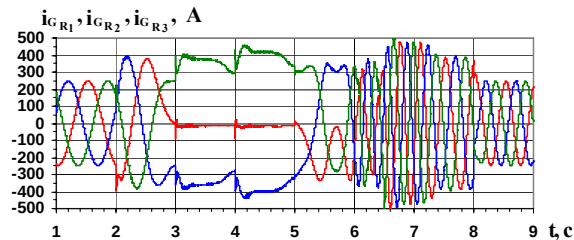


Рис. 4. $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ - фазні струми ротора генератора

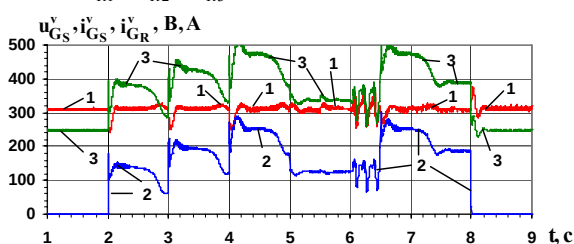


Рис. 5. $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{GR}^v$ - модулі зображувальних векторів напруги і струму статора генератора (криві 1, 2) та струму ротора генератора (крива 3) відповідно

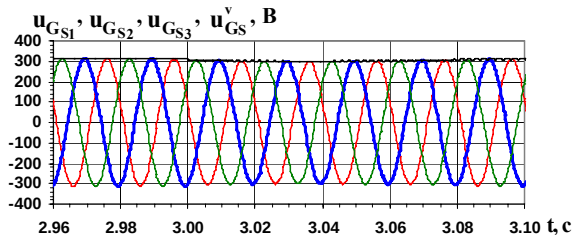


Рис. 6. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=3$ с двигунів (криві 1,2,3 для АД1÷АД3 відповідно)

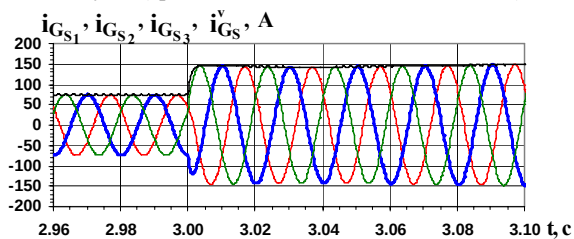


Рис. 7. Фазні струми та модуль зображувального вектора фазних струмів статора генератора у околі моменту часу $t=3$ с

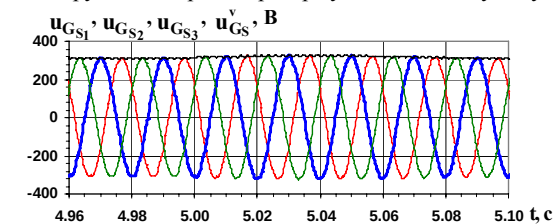


Рис. 8. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=5$ с

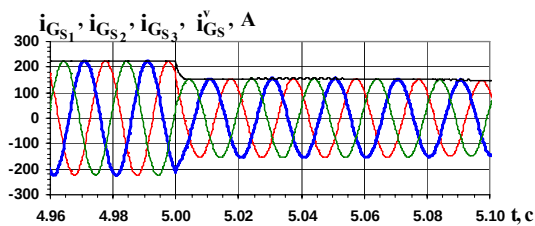


Рис. 9. Фазні струми та модуль зображувального вектора фазних струмів статора генератора у околі моменту часу $t=5$ с

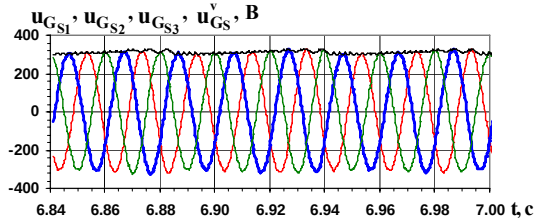


Рис. 10. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=7$ с

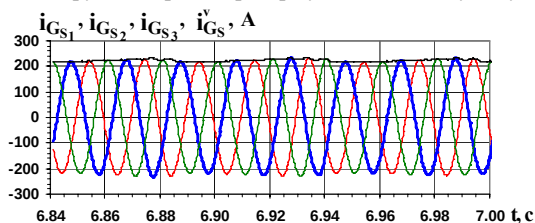


Рис. 11. Фазні струми та модуль зображувального вектора фазних струмів статора генератора у околі моменту часу $t=7$ с

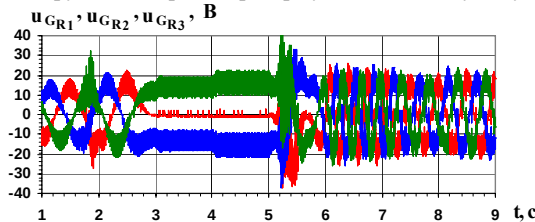


Рис. 12. $u_{GR1}, u_{GR2}, u_{GR3}$ - фазні напруги ротора генератора

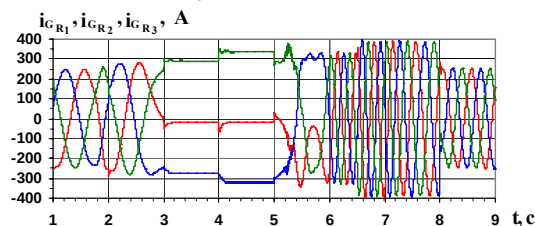


Рис. 13. $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ - фазні струми ротора генератора

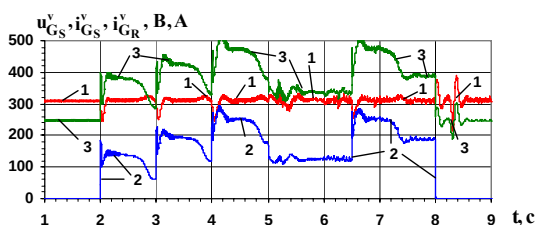


Рис. 14. $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{GR}^v$ - модулі зображувальних векторів напруги і струму статора генератора (криві 1, 2) та струму ротора генератора (крива 3) відповідно

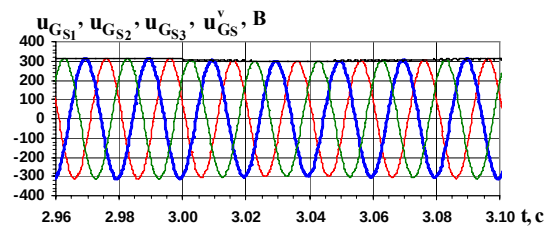


Рис. 15. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=3$ с

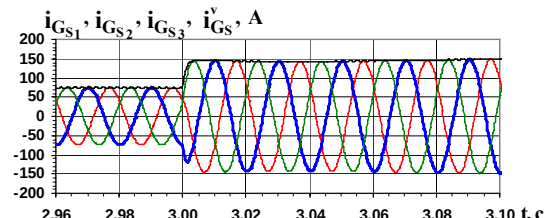


Рис. 16. Фазні струми та модуль зображувального вектора фазних струмів статора генератора у околі моменту часу $t=3$ с

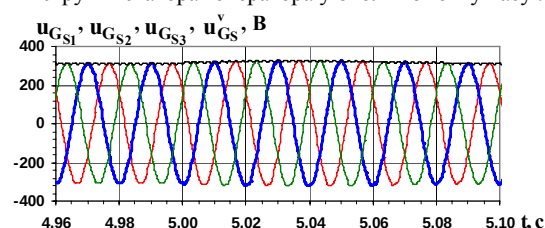


Рис. 17. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=5$ с

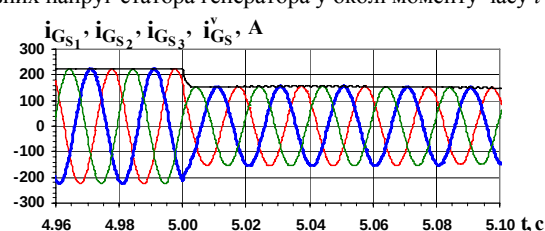


Рис. 18. Фазні струми та модуль зображувального вектора фазних струмів статора генератора у околі моменту часу $t=5$ с

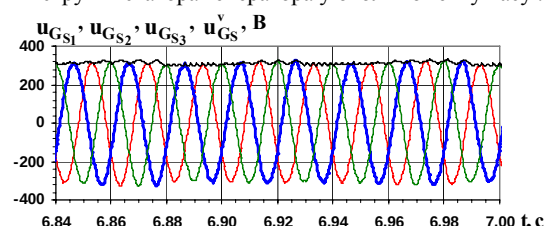


Рис. 19. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=7$ с

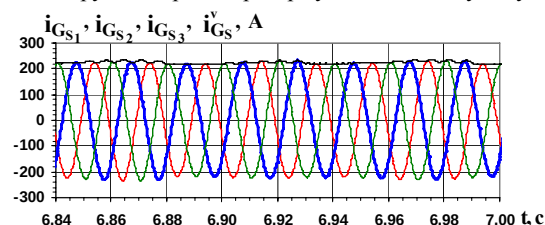


Рис. 20. Фазні струми та модуль зображувального вектора фазних струмів статора генератора у околі моменту часу $t=7$ с

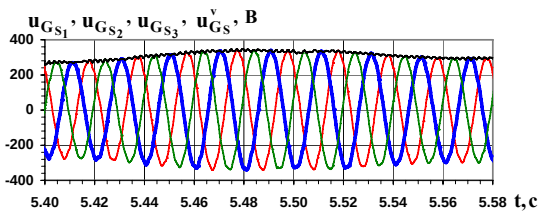


Рис. 21. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=5,5$ с

Проаналізуємо результати розрахунку електромагнітних процесів для робочого режиму, для якого споживачі вмикаються та вимикаються за таким алгоритмом. Кожен з трьох споживачів (активно-індуктивні навантаження на схемі М, Н, Ф) вмикаються відповідно у моменти часу: $t=2$ с, $t=3$ с, $t=4$ с. У момент часу $t=5$ с другий споживач (активно-індуктивне навантаження Н) відмикається, а у момент часу $t=6,5$ с він знову вмикається. Робочий цикл закінчується одночасним відімкненням всіх трьох споживачів. Відзначимо, що протягом цілого робочого циклу працює система автоматичного стабілізування напруги, у якій функцію стабілізування виконує пропорційно-інтегральний регулятор.

На рис. 2 ÷ 11 відображено основні електромагнітні величини АСГ для стану ключів, коли $K_F=1$. На рис. 2 відображено графік ковзання. Як бачимо, ця крива характерна інтенсивною динамікою, що дає змогу простежити за роботою генератора та поведінкою системи для екстремальних умов роботи (рвучкої зміни швидкості обертання рушія генератора).

На рис. 3 та рис. 4 відповідно відображені розрахункові залежності $u_{G_{R1}}, u_{G_{R2}}, u_{G_{R3}}$ - фазних напруг та $i_{G_{R1}}, i_{G_{R2}}, i_{G_{R3}}$ - фазних струмів ротора генератора. Струми та напруги ротора генератора змінюються з двоякою частотою: заповнення та огинаючою частотою (частотою модуляції). Частота заповнення визначається співвідношенням кількості пар полюсів машин модулятора АМ1, АМ2 та генератора. У даному випадку (для $p_0^{(1)}=4$, $p_0^{(2)}=8$ і $p_{G_0}=2$) частота заповнення становить 150 Гц. Частота модуляції визначається модулем значення ковзання за формулою $f_K = |S| \cdot f_F$, де S - ковзання генератора, а f_F - частота мереж Е1 та Е2 живлення машин модулятора (рис.1). Тому при ковзанні з нульовим значенням фазні струми ротора генератора будуть випрямленими. З рис. 3 та рис. 4 видно, що на проміжку часу від нуля до $t=2,5$ с частота модуляції цих струмів становить 1 Гц, що відповідає ковзанню $S=0,02$. На проміжку часу від $t=3$ с до $t=5$ с маємо випрямлені струми. На решті двох проміжках з постійним значенням модуля ковзання $t=6 \div 7$ с та $t=7,5 \div 9$ с частота струмів ротора генератора відповідно становить 3 та 2 Гц.

На проміжках динамічної зміни ковзання частота струмів ротора генератора теж змінюється динамічно за описаною вище закономірністю. Згідно з фізикою процесів та принципом функціонування АСГ з БКМЗ частота f_F визначає f_G - частоту напруги статора генератора ($f_F = f_G$).

Характер кривих напруг та струмів на рис. 3 та 4 виразно ілюструє моменти ввімкнення та відімкнення

споживачів генератора. Форма кривих напруг на рис. 3, отримана шляхом математичного експерименту, виразно підтверджує очікуваний ефект забезпечення високої якості струмів збудження. Це досягнуто впровадженням комбінованого керування вентилями комутатора [8].

Якість струмів збудження істотно залежить від належного функціонування комутатора, на роботу якого безпосередньо мають вплив параметри його системи керування. До таких параметрів належать α_p кут регулювання та вставка струму БТПЧ. Окремо результатів розрахунків для різних значень цих параметрів не наводимо, а лише зазначимо, що ці параметри теж мають істотний вплив на перебіг електромагнітних процесів і на якісні показники напруг статора генератора зокрема. Для забезпечення нормальної роботи комутатора при інвертуванні напруг (у околі вузлів модуляції напруг) на виході модулятора кут регулювання має бути з випередженням, тобто з від'ємним знаком. Дослідження показують, що для забезпечення нормальної роботи комутатора і, у такий спосіб, високої якості напруги генератора у динамічних режимах роботи та при більших значеннях ковзання генератора, модуль кута регулювання слід збільшувати. Конкретні числові значення кута регулювання можна встановити лише шляхом математичного або ж фізичного експериментування. За результатами даних досліджень встановлено, що для динамічних режимів АСГ оптимальне значення кута регулювання становить $\alpha_p = -50^\circ$.

Окрім кута регулювання циклоконвертора, одним з важливих параметрів системи керування комутатором є вставка за струмом. Алгоритм роботи системи керування оперує параметром вставки для реалізування комбінованого (сумісного у поєднанні з роздільним) керування зустрічними тиристорними групами комутатора [8]. Як і у випадку з кутом регулювання, числові значення вставки можна визначити шляхом математичного чи фізичного експерименту. За результатами даних досліджень встановлено, що оптимальне значення вставки за струмом становить $h=0,5$ А.

Для інтегральної оцінки процесів на цілому проміжку розрахунків використаємо поняття зображувальних векторів. Стосовно періодичних гармонічних величин це миттєві значення амплітуд. На рис. 5 відображено $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{G_R}^v$ - розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних напруг та струмів статора (криві 1 і 2) та струми ротора генератора (крива 3). Як видно з цього рисунку амплітуди фазної напруги статора генератора утримується на рівні заданого системою автоматичного керування значення, що становить 311 В. Це значення відрізняється лише у околі точок, що відповідають моментам часу ввімкнення або відімкнення споживачів.

Для аналізу електромагнітних процесів (зокрема для визначення якості електричної енергії за критерієм частоти напруги та струму) найбільшу зацікавленість становлять моменти часу, у яких ковзання є змінним, оскільки рвучка зміна швидкості обертання рушія є джерелом збурення. Тому, для кількісного аналізу частоти фазної напруги статора генератора особливу увагу звернемо на розрахункові залежності миттєвих значень фазних напруг статора генератора у околі точок для моментів часу: $t=2,5; 3,0; 5,0; 5,5; 6,0$;

7,0 та 7,5 с. Саме у цих точках функція ковзання має злам між окремими лінійними ділянками. Це ж питання актуальне і для моментів часу ввімкнення та відімкнення споживачів. На рис. 6 відображені $u_{G_{S1}}, u_{G_{S2}}, u_{G_{S3}}, u_{G_S}^v$ - розрахункові залежності фазних напруг та модуля зображувального вектора фазних напруг статора генератора. На рис. 7 відображені $i_{G_{S1}}, i_{G_{S2}}, i_{G_{S3}}, i_{G_S}^v$ - розрахункові залежності фазних струмів та модуля зображувального вектора фазних струмів статора генератора відповідно. Криві на рис. 6 та рис. 7 отримані на проміжку у околі моменту часу $t=3$ с, що відповідає ввімкненню другого споживача (активно-індуктивного навантаження). А на рис. 8 та рис. 9 відображені ці ж струми та напруги, але у околі моменту часу $t=5$ с, у який відмикається другий споживач. На рис. 10 та рис. 11 ці ж струми та напруги у околі моменту часу $t=6,9$ с, де ковзання є стабільним і має максимально від'ємне значення ($S=-0,06$).

Аналіз кривих миттєвих значень фазних напруг та струмів статора генератора з рис. 6÷11 та інших результатів моделювання процесів показує, що частота напруг та струмів статора генератора строго дорівнює заданому значенню, яке становить 50 Гц для цілого діапазону розрахунків процесів ($t=0 \div 9$ с) включно з моментами часу, у яких функція ковзання має злами та моментами часу ввімкнення та відімкнення споживачів.

У плані дослідження динамічних електромагнітних та електромеханічних процесів АЕЕС з БКМЗ важливим питанням є з'ясування впливу на процеси схем модулятора. Тому такі дослідження виконано. На рис. 12÷21 відображені основні електромагнітні величини для схеми модулятора, коли $K_F=2$ (схема зі з'єднанням у один спільний вузол розщеплених фазних віток ротора АМ2).

На рис. 12 та 13 відображено $u_{G_{R1}}, u_{G_{R2}}, u_{G_{R3}}$ та $i_{G_{R1}}, i_{G_{R2}}, i_{G_{R3}}$ - розрахункові осцилограми фазних напруг та струмів ротора генератора. На рис. 14 відображено $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{G_R}^v$ - модулі зображувальних векторів напруги і струму статора генератора (криві 1, 2) та струму ротора генератора (крива 3) відповідно.

Як і для попереднього варіанту схеми модулятора, далі на решті рисунках (рис. 15÷21) відображено фазні напруги та струми генератора для другого варіанта схеми модулятора. На рис. 15 відображені $u_{G_{S1}}, u_{G_{S2}}, u_{G_{S3}}, u_{G_S}^v$ - розрахункові залежності фазних напруг та модуля зображувального вектора фазних напруг статора генератора. На рис. 16 відображені $i_{G_{S1}}, i_{G_{S2}}, i_{G_{S3}}, i_{G_S}^v$ - розрахункові залежності фазних струмів та модуля зображувального вектора фазних струмів статора генератора відповідно для моменту часу $t=3$ с, що відповідають моменту ввімкнення другого споживача.

На рис. 17, 18 відображено ці ж напруги та струми, що і на рис 15 та 16, але для моменту часу $t=5$ с, що відповідає моменту вимкнення другого споживача. На рис. 19, 20 також відображені ці ж напруги та струми, що і на рис 15 та 16, але для проміжку часу з від'ємним і максимальним за модулем значенням ков-

зання ($S=-0,06$). Рис. 21 ілюструє $u_{G_{S1}}, u_{G_{S2}}, u_{G_{S3}}, u_{G_S}^v$

- розрахункові залежності фазних напруг та модуля зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу $t=5,5$ с, який характерний максимальною динамікою зміни ковзання (рис.2).

Порівняння кривих струмів та напруг на рис. 3÷11 та 12÷21 виразно ілюструє, що якість електроенергії генератора для другої схеми модулятора (коли $K_F=2$) у порівнянні з першою схемою (коли $K_F=1$) є помітно нижчою. Хоча для усталених режимів якість електроенергії для обидвох розглянутих схем модулятора є майже однаковою. Про це свідчить форма як кривих фазних величин, так і інтегральних показників, якими є модулі зображувальних векторів струмів та напруг. Важливо зазначити, що частота фазних напруг та струмів для обидвох схем залишається стабільною і такою, що дорівнює 50 Гц.

Навіть при візуальному аналізі цих кривих напруг видно, що схеми модулятора мають істотний вплив на перебіг процесів. Як видно з цього рисунку, вищу стабільність роботи комутатора і, як наслідок, вищу якість напруги забезпечує схема з комбінованим потенціальним з'єднанням ($K_F=1$) [7]. Прийнятну за якістю напругу забезпечує схема зі спільним нулем ($K_F=2$).

Важливим кількісним показником якості електроенергії є гармонічний спектр напруг та струмів. Гармонічний аналіз фазних напруг статора генератора виконаємо для ділянок зі сталою амплітудою. Така умова необхідна для забезпечення коректності аналізу. Для виконання гармонічного аналізу фазних напруг статора генератора виберемо ділянку у околі моменту часу $t=6,9$ с, на якій ковзання має постійне і найбільше за модулем значення ($S=-0,06$). Як велася мова вище, графіки фазних напруг у околі цього моменту часу відображені на рис. 11 та 21. Як видно з цих рисунків, частота фазних напруг становить строго 50 Гц. З рисунків видно, що криві фазних напруг мають синусоїдну форму. Але ж для точного кількісного аналізу спектра гармонік фазних напруг виконаємо гармонічний аналіз. Для цього розкладемо у ряд Фур'є зображені на рис. 11 та 21 розрахункові залежності фазних напруг та струмів. Числові значення амплітуд гармонічних складових фазних напруг відображені у табл. 1. У першому стовпці таблиці вказано порядковий номер гармоніки, включаючи нульову (постійну складову). Далі, у кожній з двох наступних пар стовпців, відображено значення амплітуд гармонічних складових та їх значення у відсотках до першої гармоніки для кожної з двох схем модулятора.

З таблиці добре видно, що числові значення лише деяких вищих гармонічних складових фазних напруг досягають 1% від значення першої гармоніки. Для схеми модулятора з комбінованим з'єднанням ($K_F=1$) найбільшою є друга гармонічна складова, значення якої становить лише 1,14%. Решта вищі гармоніки мають ще менші значення, які не досягають навіть 1,0%. Якість фазної напруги для другого варіанту схеми модулятора ($K_F=2$), є приблизно такою, як і для першого. Тут найбільше значення вищих гармонік, якою є теж друга, становить 1,06%. Серед решти вищих гармонік найбільші значення мають четверта – 1,02% та 11-та – 1,01%. Аналогічно виконано гармонічний аналіз фазних струмів генератора для обидвох схем модулятора. Результати гармонічного аналізу

фазних струмів відображені у табл. 2. Як бачимо з цієї таблиці, якість фазних струмів статора генератора є ще вищою, ніж напруг.

Таблиця 1

Амплітуди гармонік фазних напруг статора генератора та їх значення у відсотках до першої гармоніки для двох варіантів схеми модулятора

№ гармоніки	$K_F = 1$		$K_F = 2$	
	u_{G_S}	$u_{G_S}, \%$	u_{G_S}	$u_{G_S}, \%$
0	1.25	0.4	0.89	0.28
1	310.99	100	312.38	100
2	3.55	1.14	3.32	1.06
3	1.85	0.59	1.08	0.35
4	1.24	0.4	3.19	1.02
5	0.96	0.31	1.82	0.58
6	0.83	0.27	0.88	0.28
7	0.79	0.25	0.61	0.2
8	2.18	0.7	1.26	0.4
9	1.91	0.61	1.42	0.45
10	2.3	0.74	1.86	0.6
11	2.36	0.76	3.15	1.01
12	0.75	0.24	1.17	0.37
13	0.44	0.14	0.88	0.28
14	0.34	0.11	0.6	0.19
15	0.29	0.09	0.58	0.19
16	0.28	0.09	0.48	0.15
17	0.27	0.09	0.28	0.09
18	1.1	0.35	0.49	0.16
19	0.34	0.11	0.43	0.14

Таблиця 2

Амплітуди гармонік фазних струмів статора генератора та їх значення у відсотках до першої гармоніки для двох варіантів схеми модулятора

№ гармоніки	$K_F = 1$		$K_F = 2$	
	u_{G_S}	$u_{G_S}, \%$	u_{G_S}	$u_{G_S}, \%$
0	0.95	0.42	0.52	0.23
1	223.55	100	224.3	100
2	2.45	1.1	2.17	0.97
3	1.24	0.55	0.78	0.35
4	0.83	0.37	1.18	0.53
5	0.63	0.28	0.93	0.41
6	0.52	0.23	0.56	0.25
7	0.45	0.2	0.45	0.2
8	0.57	0.25	0.57	0.25
9	0.65	0.29	0.17	0.08
10	0.71	0.32	0.3	0.13
11	0.34	0.15	0.79	0.35
12	0.15	0.07	0.36	0.16
13	0.15	0.07	0.28	0.12
14	0.15	0.07	0.24	0.11
15	0.15	0.07	0.2	0.09
16	0.15	0.07	0.19	0.08
17	0.16	0.07	0.15	0.07
18	0.24	0.11	0.15	0.07
19	0.18	0.08	0.43	0.14

Судячи з гармонічного аналізу фазних струмів та напруг, очевидним є висновок про те, що системи генерування даного класу під час роботи генератора на активно-індуктивне навантаження забезпечують споживачів високоякісною електричною енергією як за параметром частоти напруги, так і за параметром гармонічного спектру напруг та струмів.

ВИСНОВКИ

1. Розрахунки динамічних електромагнітних та електромеханічних процесів АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ під час роботи на активно-індуктивне навантаження підтверджують роботоздатність систем генерування даного класу.

2. Для динамічних режимів роботи вищий рівень якості напруги статора генератора забезпечує силова схема модулятора з комбінованим потенціальним розділенням.

3. В усталених режимах роботи системи схема силового електричного кола модулятора не має істотного впливу на роботу збуджувача та системи в цілому.

4. Комбінований спосіб керування вентилями комутатора та кут регулювання з випередженням забезпечують стійкість роботи комутатора і, як наслідок, високу якість напруги навіть у динамічних режимах роботи генератора та при інтенсивних перехідних процесах, спричинених ввімкненням та відімкненням статичного навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Василів К.М., Галиновський О.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи "Асинхронний генератор з трипульсним модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів" // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електродинаміка.- К.: Ін-т електродинаміки НАНУ, 2000.-С. 153-163.
- [2] Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем // Техн. електродинаміка.- 2004. - № 5. – С. 50-55.
- [3] Василів К.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з двофазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем // Техн. електродинаміка.- 2002.-№ 6.–С. 31-37.
- [4] Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем // Техн. електродинаміка.- 2005. - № 2. – С. 54-60.
- [5] Василів К.М. Математичне моделювання динамічних процесів неробочого ходу автономної електроенергетичної системи на базі генератора з беконтактним трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем. // Техн. Електродинаміка. Тематичний випуск. – Силова електроніка та енергоефективність.- 2004, ч.2. – С. 99-105.
- [6] Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты. Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по электромеланотронике. Санкт-Петербург, 1997. -С. 182-192.
- [7] Галиновский А.М. Модулированный преобразователь частоты с комбинированным потенциальным разделением обмоток Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по электромеханотронике. Санкт-Петербург, 1997. -С. 193-196.
- [8] Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Васылив К.Н., Хайкал Шейфан Фуад. Способ управления и качество формы кривой выходного напряжения модулированного преобразователя частоты. Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по электромеханотронике. Санкт-Петербург, 1997. -С. 216-222.

Надійшла 15.11.2005