

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ БЕЗКОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗІ КАСКАДНОГО ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНОГО МОДУЛЯТОРА НАПРУГИ

Л.І. Мазуренко^{1*}, докт.техн.наук, К.М. Василів², докт.техн.наук

¹ - Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: mlins@ied.org.ua

² - Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна.

Встановлено закономірності перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній системі збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги щодо можливості розширення діапазону двозонного ковзання генератора. Запропоновано спосіб коригування параметрів роторів машин модулятора та генератора, який дає змогу стабілізувати роботу комутатора в діапазоні ковзання $S = -1 \div +0,4$. Бібл. 4, рис. 5.

Ключові слова: асинхронізований генератор, модулятор напруги, комутатор, безконтактна система збудження, ковзання.

Вступ. Автономна електроенергетика становить вагому частку загальної системи генерування та споживання електричної енергії через те, що автономні електроенергетичні установки (АЕЕУ) знаходять достатньо широке застосування як у промисловості, так і в інших галузях, зокрема, на транспорті, на магістралях транспортування органічних енергоносіїв – нафтопроводах та газогонках. Перспективним вбачається використання вітроенергетичних установок, які можуть працювати як паралельно зі стаціонарною електричною мережею, так і в автономному режимі. Порівняно зі стаціонарними електричними станціями автономні електроенергетичні установки мають особливості: висока ймовірність роботи генератора АЕЕУ в режимі граничних навантажень, що призводить до проблеми надійності її функціонування; нестабільність частоти обертання приводного двигуна генератора (наприклад, вітроенергетичні установки) іншу складну проблему – нестабільність частоти напруги.

Аналіз наукової літератури та практичних рішень показує, що обидві ці складні проблеми можуть бути ефективно вирішені використанням у АЕЕУ асинхронізованих генераторів (АСГ) із безконтактною вентиляційною системою збудження (БВЗ) [1–3]. Ідея застосування таких АСГ перебуває у стані постійного еволюційного розвитку, а їхнє практичне застосування може бути реалізовано у багатьох варіантах схемних рішень [1–4]. Усі такі генератори працюють за однаковим принципом, але кожен з них має свої специфічні особливості щодо фізики електромагнітних процесів. Тому в наукових дослідженнях необхідно проаналізувати кожен з таких схем окремо.

Об'єктом дослідження у роботі є безконтактна вентиляційна система збудження АСГ на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги (К Т-Т МН) за схемою дві зірки, що складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розщеплені на три вітки та з'єднані між собою послідовно перехресними зв'язками (рис. 1). На вході фазні вітки роторів машин модулятора можуть мати три варіанти з'єднання: 1) потенціальне комбіноване ($K=1$), коли ключі K_1 замкнені, а ключі K_2 розімкнені; 2) окреме з'єднання груп фазних віток ($K=2$), коли ключі K_1 розімкнені, а ключі K_2 замкнені; 3) спільне з'єднання всіх фазних віток ($K=3$), коли ключі K_1 і K_2 замкнені. Статорні обмотки асинхронних машин модулятора живляться від джерел E_1 та E_2 , які мають взаємно зворотну послідовність фаз. Прийнято, що джерела E_1 , E_2 є акумуляторними батареями з вентиляційними перетворювачами частоти. До системи збудження входить комутатор – безпосередній тиристорний перетворювач частоти ТР, від якого живиться обмотка ротора АСГ (на схемі АГ), фази якої розщеплені на дві вітки. Решта позначень як на схемі рис. 1, так і у подальших викладках є такими. Буквами E , F , G позначено належність величин до електричних мереж, модулятора напруги та АСГ. У верхніх індексах цифрами 1 та 2 позначено належність до першого та другого трифазного джерела. Буквами φ , i позначено електричні потенціали та струми. S , R показують належність до статора і ротора електричних машин (АМ1, АМ2, АСГ). Штрихами у верхніх індексах потенціалів φ' , φ'' та φ''' позначено потенціали вузлів, які утворюються внаслідок замикання ключів K_1 та K_2 .

Згідно з теорією АСГ із БВЗ на базі каскадних модуляторів напруги (КМН) [3], частота напруги обмотки статора генератора визначається частотою напруги джерел живлення машин модулятора і не залежить від частоти обертання ротора генератора, який має спільний вал з роторами асинхронних машин модулятора напруги.

З метою перевірки такого твердження розроблено математичні моделі та відповідні програмні комплекси для аналізу процесів і режимів роботи автономних систем електроживлення на базі АСГ з модуляторами

© Мазуренко Л.І., Василів К.М., 2018

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-7059-249X>

напруги безконтактних систем збудження [4]. Із застосуванням цих математичних моделей і програмних комплексів виконано аналіз режимів роботи АСГ за всіма можливими схемами силового електричного кола системи збудження АСГ під час його роботи на навантаження різних типів: асинхронні двигуни, активно-індуктивне та активно-індуктивно-емнісне навантаження в різних їхніх комбінаціях.

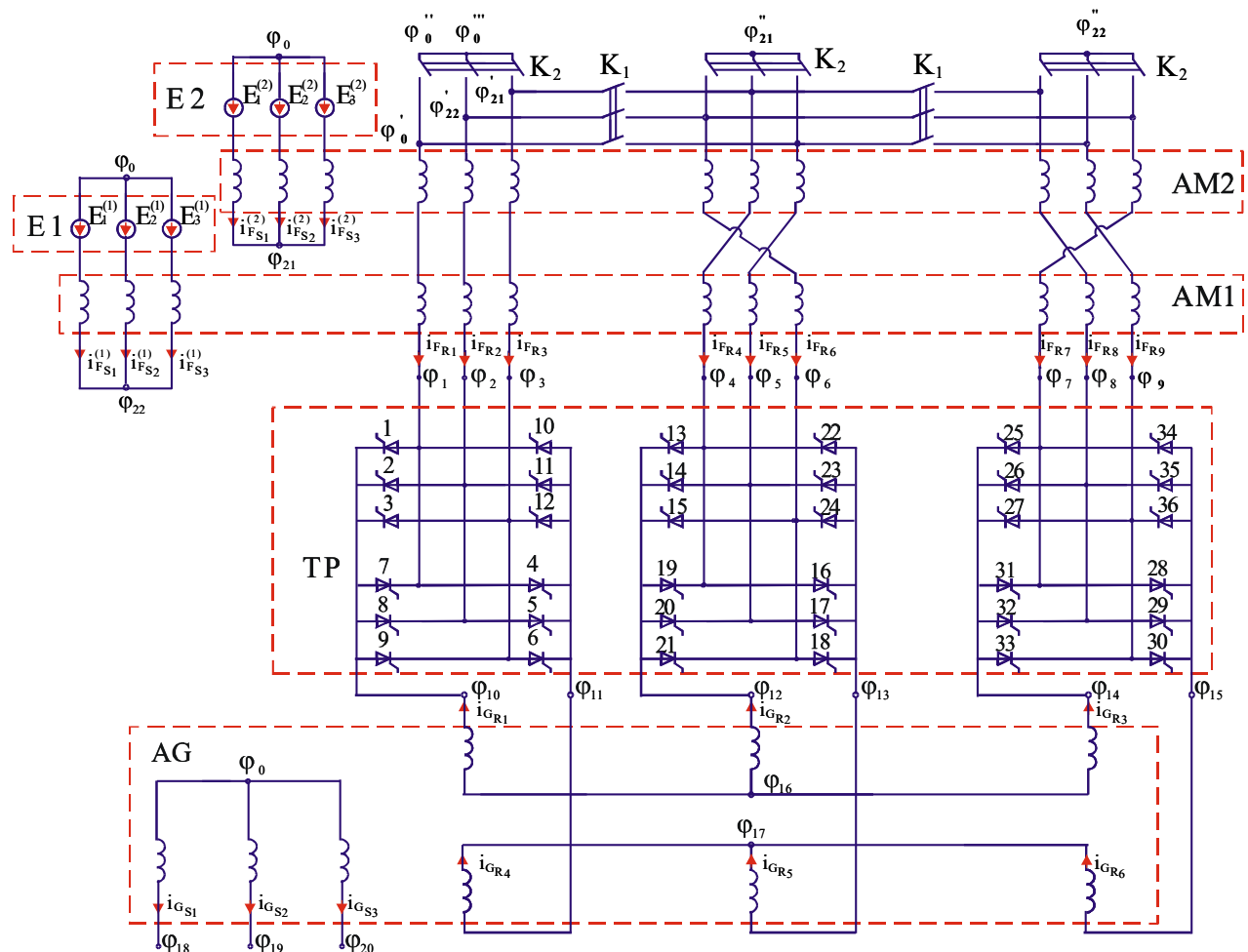


Рис. 1

Моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в таких системах електроживлення, проводилося із використанням параметрів електричних машин стандартного виконання. За результатами дослідження встановлено пріоритет схемних рішень, а також діапазон ковзання, в межах якого забезпечується роботоздатність системи збудження і, як наслідок, висока якість напруги генератора за критерієм частоти, амплітуди та гармонічного спектра. Діапазон ковзання, за якого досягається роботоздатність БВСЗ (саме цей чинник є визначальним у роботі АСГ такого типу), становить $S = \pm 0,06$. Такий діапазон ковзання, з одного боку, є прийнятним, бо підтверджує функціонування АСГ, а, з іншого, – зменшує можливості практичного застосування АСГ. Отримані результати дослідження свідчать, що розширення діапазону двозонного ковзання АСГ з БВСЗ на базі КМН є актуальною науково-практичною проблемою, вирішення якої значно збільшить можливості практичного застосування таких генераторів у АЕЕУ.

Метою роботи є встановлення закономірностей перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в АСГ з безконтактною вентиляльною системою збудження на базі КМН, та їхнє використання для розширення робочого діапазону двозонного ковзання АСГ.

Викладення основного матеріалу. Результати попередніх досліджень вказують на те, що під час виходу за межі певного діапазону ковзання відбувається блокування роботи („витіснення”) вентиляльних груп, які на виході циклоконвертора формують півхвилю напруги одного знаку вентиляльними групами, які формують півхвилю напруги протилежного знаку, що унеможливає отримання змінної напруги в обмотці ротора генератора частоти ковзання, яка і дає змогу отримати стабільну частоту обертання магнітного поля відносно обмотки статора АСГ і, як наслідок, стабільну частоту напруги статора генератора.

Робота комутатора визначається параметрами роторів асинхронних машин модулятора і самого генератора, які мають вплив на його роботу. Великі їхні значення спричиняють інерційність електромагнітних про-

цесів у колах роторів машин і комутатора, внаслідок чого відбувається „витіснення” вентильних груп циклоконвертора. Отже, для уникнення цього негативного явища необхідно змінити параметри обмоток роторів машин модулятора і самого генератора. Це досягається шляхом зміни співвідношення кількості витків обмоток статора і ротора асинхронних машин модулятора і генератора.

Нижче наведено результати досліджень роботи БВСЗ асинхронізованого генератора потужністю 100 кВт для значення коефіцієнтів трансформації машин модулятора, які дорівнюють 20 ($K_F=20$), та коефіцієнта трансформації АСГ, який дорівнює 10 ($K_G=10$). На рис. 2 показано розрахункові залежності від часу миттєвих значень струмів перших трьох віток роторів машин модулятора для ковзання $S=-0,8$, з якого видно, що фазні струми роторів машин модулятора мають модульовану форму з частотою ковзання $F_S=40$ Гц, для якої період становить $T=0,025$ с. Така форма фазних струмів роторів машин модулятора за нормальної роботи комутатора має забезпечувати у фазних вітках ротора АСГ напруги і струми частоти ковзання, зображені на рис. 3.

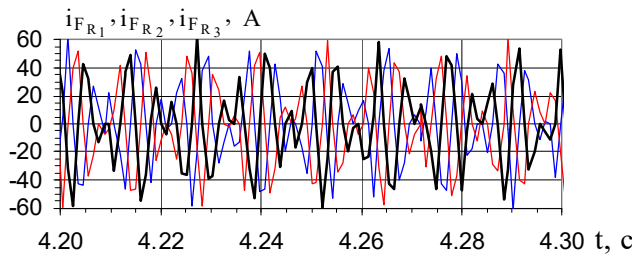


Рис. 2

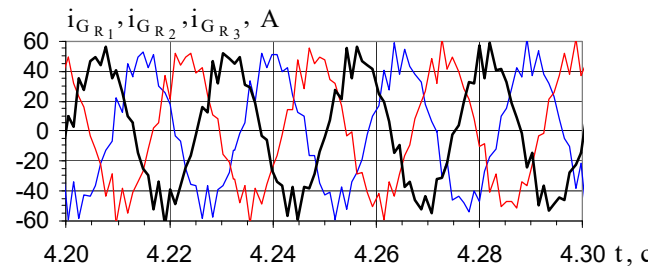


Рис. 3

Рис. 3 підтверджує, що струми фазних віток першої зірки ротора генератора (рис. 1) мають частоту ковзання. Струми другої зірки мають подібну форму, але знаходяться у протифазі до струмів першої зірки. Магнітне поле АСГ створюється струмами обох зірок обмотки ротора генератора.

На рис. 4 показано півсуми миттєвих значень струмів двох розщеплених віток фаз ротора генератора для $S=-0,8$

$$i_{G_{\mu_1}} = (i_{G_{R_1}} + i_{G_{R_4}}) / 2; \quad i_{G_{\mu_2}} = (i_{G_{R_2}} + i_{G_{R_5}}) / 2; \quad i_{G_{\mu_3}} = (i_{G_{R_3}} + i_{G_{R_6}}) / 2.$$

Ці струми є еквівалентом намагнічувальної сили, а їхня частота (яка дорівнює частоті ковзання) вказує на те, що магнітне поле ротора, створене цими струмами, обертається відносно обмотки статора з частотою $f=50$ Гц, що і забезпечує генерування напруги статора генератора тієї самої частоти, хоча ковзання відмінне від нуля.

Форма кривих струмів на рис. 2–4 підтверджує те, що наведені вище міркування стосовно забезпечення нормальної роботи системи збудження є логічними, адже тут навіть для великого значення ковзання струми на рис. 4 мають синусоїдну форму. Це дає підстави очікувати належної якості напруги генератора як мінімум за критерієм частоти, що принципово важливо для автономних джерел електроживлення. Виконані дослідження показують, що ця система збудження АСГ роботоздатна в діапазоні від’ємних ковзань від $S=-1$ до $S=0$.

Для АСГ цього типу характерним є двозонність ковзання. Тому важливо знати можливості генератора в додатному діапазоні ковзання. У цьому контексті також проведено дослідження, за результатами яких встановлено, що для додатного ковзання система збудження є роботопридатною у діапазоні від $S=0$ до $S=0,6$, проте якісної напруги можна очікувати для ковзання від $S=0$ до $S=0,4$. З метою надання більш предметної інформації щодо цього питання на рис. 5 зображено півсуми миттєвих значень струмів двох розщеплених віток фаз ротора генератора для ковзання $S=+0,2$, з якого видно, що струми є періодичними. Такий характер струмів обмотки ротора дає підставу стверджувати, що частота напруги генератора також залишатиметься стабільною і такою, що дорівнює частоті джерел живлення $E1$ та $E2$.

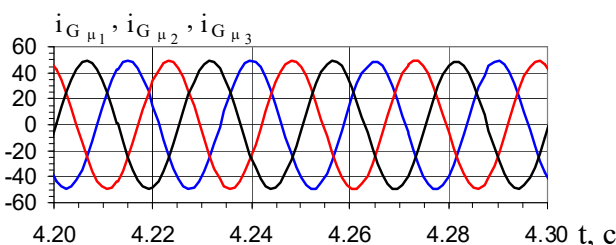


Рис. 4

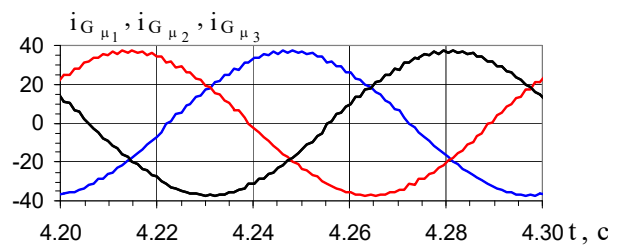


Рис. 5

Висновки. 1. На підставі аналізу електромагнітних процесів, які відбуваються в АСГ з БВСЗ на базі КМН, встановлено закономірності їхнього перебігу в контексті залежності форми фазних напруг і струмів обмотки ротора АСГ від значення двозонного ковзання та параметрів ротора генератора і роторів машин модулятора.

2. Шляхом зміни параметрів роторів машин модулятора і ротора АСГ досягнуто розширення діапазону робочого ковзання генератора в межах від $S=-1$ (для від’ємної зони) до $S=+0,4$ (для додатної зони).

3. Такий діапазон робочого ковзання створює достатні умови для практичного застосування генераторів цього класу в автономних системах електроживлення з широким діапазоном зміни частоти обертання приводного двигуна.

1. Yanmei Yao. Study of Induction Machines with Rotating Power Electronic Converter. *Doctoral Thesis Stockholm*. Sweden, 2016. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1045804/FULLTEXT01.pdf>

2. Naveed Ur Rehman Malik. Modelling, Analysis and Control Aspects of a Rotating Power Electronic Brushless Doubly-Fed Induction Generator. *Doctoral Thesis in Electrical Machines and Drives Stockholm*. Sweden, 2015. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/79ee/303c7376f34e74357ec593d49c46243204b0.pdf>

3. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты. *Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по электромехатронике*. Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. 1997. С. 182-192.

4. Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем. *Технічна електродинаміка*. 2004. № 5. С. 50-55.

УДК 621.313

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОНОМНОГО АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ КАСКАДНОГО ТРЕХФАЗНО-ТРЕХФАЗНОГО МОДУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Л.И. Мазуренко¹, докт.техн.наук, К.Н. Васылив², докт техн.наук

¹- Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: mlins@ied.org.ua

²- Национальный университет "Львовская политехника", ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина.

Установлены закономерности электромагнитных процессов, протекающих в бесконтактной системе возбуждения асинхронизированного генератора на базе трехфазно-трехфазного модулятора напряжения на предмет возможности расширения диапазона двухзонного скольжения генератора. Предложен способ корректировки параметров роторов машин модулятора и генератора, позволяющий стабилизировать работу коммутатора в диапазоне $S = -1 \div +0,4$. Библ. 4, рис. 5.

Ключевые слова: асинхронизированный генератор, модулятор напряжения, коммутатор, бесконтактная система возбуждения, скольжение.

THE LAW OF THE ELECTRIC MAGNETIC PROCESSES OF THE SECURITY EXERCISE SYSTEMS OF THE AUTONOMOUS ASYNCHRONIZED GENERATOR ON THE CASE OF THE CASCADE THREE-PHASE THREE-FLEXIBLE VOLTAGE MODULATOR

L.I. Mazurenko¹, K.M. Vasyliv²

¹- Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: mlins@ied.org.ua

²- Lviv Polytechnic National university,

S. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine.

The laws of the course of the electromagnetic processes occurring in the contactless excitation system of the asynchronous generator on the basis of a cascade three-phase, three-phase voltage modulator on the possibility of expansion of the biphasal slip range of the generator are established. The method of correction of parameters of the rotors of the machines of the modulator and generator is offered, which allows to stabilize operation of the switch in the range of slip $S = -1 \div +0,4$. References 4, figures 5.

Key words: asynchronous generator, voltage modulator, switch, contactless excitation system, slide.

1. Yanmei Yao, Study of Induction Machines with Rotating Power Electronic Converter. *Doctoral Thesis Stockholm*, Sweden 2016 URL : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1045804/FULLTEXT01.pdf>

2. Naveed Ur Rehman Malik. Modelling, Analysis, and Control Aspects of a Rotating Power Electronic Brushless Doubly-Fed Induction Generator. *Doctoral Thesis in Electrical Machines and Drives*. Stockholm, Sweden 2015 URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/79ee/303c7376f34e74357ec593d49c46243204b0.pdf>

3. Galynovskiy A.M. Non-contact asynchronous generator with a modulated frequency converter. *Trudy I Mezhdunarodnoi (III Vserossiiskoi) konferentsii` po Elektromekhanotronike*. Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet. 1997. Pp. 182-192. (Rus)

4. Vasyliv K.M. Mathematical model of the dynamic processes of an autonomous electroenergetic system based on a noncontact asynchronous generator with a three-phase three-phase cascade modulated exciter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2004. No 5. Pp. 50-55. (Ukr)

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 29.05.2018