

CONSTRUCTION AND RESEARCH OF STATIC CHARACTERISTICS OF AN ASSYNCHRONIZED GENERATOR**Kliuiev O.**

*candidate of technical sciences, associate professor
of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics,
Dniprovsk State Technical University, Kamianske,
Dnipropetrovsk region, Ukraine
ORCID: 0000-0003-4542-3317*

ПОБУДОВА І ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА**Клюєв О.В.**

*кандидат технічних наук, доцент кафедри
електротехніки та електромеханіки,
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське,
Дніпропетровська область, Україна
ORCID: 0000-0003-4542-3317
<https://doi.org/10.5281/zenodo.11200351>*

Abstract

In the article without using an equivalent circuit analytical expressions for constructing external characteristics and transmitted power are obtained directly from the dynamics equations of an assynchronized generator (ASG). A comparative analysis of the static characteristics of ASG in asynchronous and synchronous operating modes was carried out.

Анотація

У статті без використання схеми заміщення безпосередньо з рівнянь динаміки асинхронізованого генератора (АСГ) отримані аналітичні вирази для побудови його зовнішніх характеристик і активної потужності. Проведено порівняльний аналіз статичних характеристик АСГ в асинхронному і синхронному режимах роботи.

Keywords. Assynchronized generator, mathematical model equations, external characteristics, type of electrical load, stability margin.

Ключові слова. Асинхронізований генератор, рівняння математичної моделі, зовнішні характеристики, тип електричного навантаження, запас стійкості.

Постановка проблеми. Збільшення значень реактивних опорів, а також зростання довжини ліній електропередачі та їх потужностей приводить до зниження динамічної стійкості електричних систем. Важливу проблему, з якою пов'язана експлуатація генераторів, представляє також робота енергосистеми в години зниження активного навантаження. Виникаючий при цьому надлишок реактивної потужності може призвести до неприпустимого підвищення напруги в лінії. Для запобігання цього в системі повинні бути передбачені пристрої, що споживають надлишок реактивної потужності. АСГ завдяки своїм можливостям допускає багатопільове використання. Він застосовується не тільки для виробництва електроенергії, але також може використовуватися як кероване джерело реактивної потужності з великим регульовальним діапазоном, особливо у напрямку її споживання. При обертанні вала із синхронною швидкістю АСГ працює як звичайний синхронний генератор з живленням обмотки збудження постійним струмом. На виході генератора утвориться синусоїдальна напруга необхідної частоти, наприклад

50 Гц. При зміні швидкості обертання вала зміниться також частота напруги на затискачах статора. Для того, щоб на виході АСГ створити напругу незмінної частоти, як це потрібно від якісного генератора, необхідне обертання поля збудження відносно ротора з частотою ковзання. Цього можна досягти при живленні обмоток ротора струмом частоти ковзання. Тоді поле збудження починає обертатися відносно ротора, що дозволяє компенсувати обертання ротора зі швидкістю, відмінною від синхронної. Асинхронізовані генератори відрізняються від традиційних синхронних турбогенераторів наявністю на роторі двох обмоток і двоканальною системою збудження, що забезпечує незалежне керування електромагнітним моментом (активною потужністю) і напругою (реактивною потужністю). За рахунок такого керування і можливості переміщення відносно ротора магнітного поля, створеного обмотками збудження, АСГ має значно кращі, ніж синхронні генератори, показники статичної і динамічної стійкості. Це дозволяє використовувати АСГ у режимах глибокого споживання з мережі реактивної потужності для нормалізації рівнів напруги, у чому виникає необхідність

при надлишку реактивної потужності в мережах, обумовленому наявністю високовольтних кабельних і повітряних ліній електропередач, недостатністю засобів, що компенсують, зниженням навантажень, особливо в літній період і нічний час [1].

АСГ є різновидом машини подвійного живлення, можливості якої з генерації і споживання реактивної потужності докладно досліджені в роботі [2]. У статті [3] для асинхронного режиму роботи АСГ побудовані залежності активної і реактивної потужностей статора у функції величини ковзання ротора. При цьому діапазон зміни ковзань узятий незначний і тільки для швидкостей обертання ротора нижче синхронної швидкості. У [4] створена динамічна модель АСГ в осях d,q, що працює на автономне навантаження. Наводяться характеристики холостого ходу і зовнішні характеристики при різних типах навантаження. Однак відсутні виведення формул і не дані кінцеві вирази, за якими будувалися представлені графіки статичних характеристик. У [5] представлена схема набору моделі АСГ у середовищі Matlab Simulink без запису яких-небудь рівнянь динаміки і статик. Звідси не до кінця зрозуміло, як створена модель і побудовані представлені характеристики. Криві переданої потужності і зовнішні показані тільки для активного навантаження АСГ.

У статті ставиться задача з рівнянь динаміки як найбільш загальної моделі АСГ отримати формули для розрахунку статичних характеристик АСГ при різних видах електричного навантаження, що підключається до статора.

Виклад основного матеріалу. Для побудови статичних характеристик прийнята узагальнена математична модель АСГ, представлена рівняннями [6]:

$$\vec{U}_s = \vec{I}_s R_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \quad \vec{U}_r = \vec{I}_r R_r + \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_r; \\ \vec{\Psi}_s = \vec{I}_s L_s + \vec{I}_r L_m; \quad \vec{\Psi}_r = \vec{I}_s L_m + \vec{I}_r L_r. \quad (1)$$

У векторній формі система рівнянь (1) у сталому режимі записується в такий спосіб

$$-\vec{U}_s = R_s \vec{I}_s + j\omega_0 \vec{\Psi}_s; \quad \vec{U}_r = R_r \vec{I}_r + j(\omega_0 - \omega) \vec{\Psi}_r; \\ \vec{\Psi}_s = L_s \vec{I}_s + L_m \vec{I}_r; \quad \vec{\Psi}_r = L_m \vec{I}_s + L_r \vec{I}_r. \quad (2)$$

При орієнтації системи координат за будь-яким вектором, її швидкість обертання в статистиці буде постійною і рівною круговій частоті поля в зазорі машини ω_0 . До рівнянь (2) потрібно додати рівняння навантаження

$$\vec{U}_s = R_n \vec{I}_s + L_n \frac{d\vec{I}_s}{dt} + j\omega_0 L_n \vec{I}_s, \quad (3)$$

де R_n, L_n – активний опір і індуктивність навантаження фази статора генератора.

У рівняннях напруг (2) замість поточкозчеплень підставляємо їх значення, записані через струми, а вектор $\vec{U}_s$ замінюємо виразом (3). Тоді після спрощень одержимо

$$0 = R_\Sigma \vec{I}_s + jX_\Sigma \vec{I}_s + jX_\mu \vec{I}_r;$$

$$\vec{U}_r = R_r \vec{I}_r + jsX_\mu \vec{I}_s + jsX_r \vec{I}_r, \quad (4)$$

$$\text{де } X_n = \omega_0 L_n; X_\mu = \omega_0 L_m; X_s = \omega_0 L_s;$$

$$X_r = \omega_0 L_r; R_\Sigma = R_s + R_n; X_\Sigma = X_s + X_n.$$

З першого рівняння (4) знаходимо струм ротора

$$\vec{I}_r = \frac{j\vec{I}_s (R_\Sigma + jX_\Sigma)}{X_\mu}. \quad (5)$$

Підставляємо співвідношення (5) у друге рівняння (4), після розв'язання якого відносно струму статора маємо

$$\vec{I}_s = \frac{-jX_\mu \vec{U}_r}{sX_\mu^2 + (R_r + jsX_r)(R_\Sigma + jX_\Sigma)}. \quad (6)$$

Напруга на затискачах фаз генератора в статистиці визначається за формулою

$$\vec{U}_s = (R_n + jX_n) \vec{I}_s. \quad (7)$$

Зовнішні характеристики будуються для заданого значення ковзання $s_0 = \text{const}$. Напруга збудження $\vec{U}_r = U_{ru} + jU_{rv}$ визначається в такий спосіб. Проекція U_{rv} дорівнює у відносних одиницях прийнятому ковзанню [6]:

$$u_{rv} = \frac{U_{rv}}{U_{im}} = s_0, \quad (8)$$

де U_{im} – амплітуда фазної напруги нерухомого ротора. Реактивна складова напруги ротора U_{ru} підбирається так, щоб при номінальному струмі статора його напруга дорівнювала номінальному або близькому до нього значенню.

Усі розрахунки виконувалися для асинхронної машини з фазним ротором з номінальними даними:

$$P_n = 110 \text{ кВт}, U_{nf} = 220 \text{ В}, \omega_c = 157 \text{ с}^{-1}.$$

При побудові зовнішніх характеристик струм статора змінюється шляхом зміни опору навантаження $R_n + jX_n$. Дорівнювали нулю одну зі складових навантаження і варіювалася інша складова. Таким чином, навантаження виходить цілком активним, чисто індуктивним або ємнісним. Побудова характеристик проводилася в програмі Mathcad. Після обчислення комплексів струму і напруги статора за (6) і (7) визначаються їх діючі значення за формулами

$$I_s = \frac{\sqrt{\text{Re}(\vec{I}_s)^2 + \text{Im}(\vec{I}_s)^2}}{\sqrt{2}}, \\ U_s = \frac{\sqrt{\text{Re}(\vec{U}_s)^2 + \text{Im}(\vec{U}_s)^2}}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

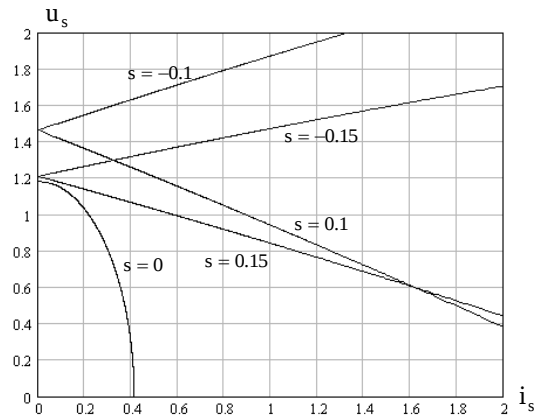


Рисунок 1 – Зовнішні характеристики АСГ при активному навантаженні ($\cos \varphi_n = 1$) і різних ковзаннях ротора

Зовнішня характеристика будується як залежність діючого значення напруги статора АСГ від діючого значення струму статора, тобто $U_s(I_s)$. Для обчислення напруги холостого ходу, коли $\bar{I}_s = 0$, підставляємо це значення струму в рівняння (2) і після перетворень одержимо наступну формулу

$$\bar{U}_s = \frac{-jX_\mu \bar{U}_r}{R_r + jsX_r}. \quad (10)$$

На рисунку 1 показані зовнішні характеристики АСГ при активному навантаженні і частоті напруги статора 50 Гц. Для всіх графіків асинхронного режиму напруга ротора однакова. Напруга і струм статора представлені у відносних одиницях:

$i_s = I_s / I_{sn}$, $u_s = U_s / U_{sn}$. З графіків можна зробити ряд висновків. В асинхронному режимі характеристики істотно більш жорсткі, чим у режимі синхронного генератора. При одному напрямку обертання поля збудження і ротора напруга, що генерується, зменшується зі збільшенням струму навантаження. Це обумовлюється тим, що потік статора (реакція якоря) для $s > 0$ спрямований зустрічно потоку збудження (ротора) і робить на машину дію, що розмагнічує. В міру зростання струму статора потік реакції якоря збільшується і результуючий потік АСГ, а також індукована їм ЕРС статора, зменшуються, що приводить до зниження напруги на навантаженні.

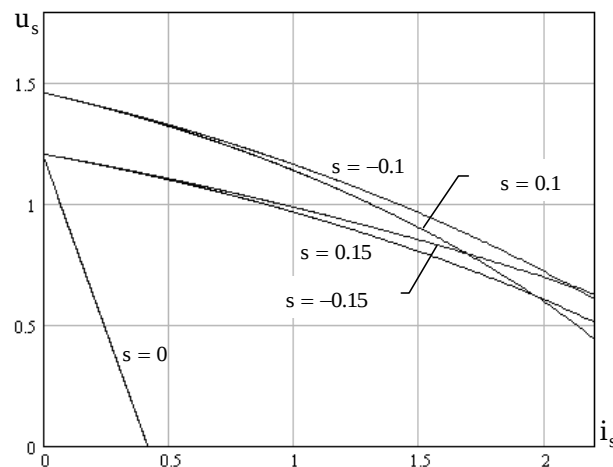


Рисунок 2 - Зовнішні характеристики АСГ при індуктивному навантаженні ($\cos \varphi_n = 0, \varphi_n > 0$) і різних ковзаннях ротора

При зустрічному напрямку обертання поля збудження і ротора ($s < 0$) напруга статора генератора при зростанні струму збільшується. Зовнішня характеристика стає зростаючою тому, що реакція якоря спрямована так само, як і потік збудження, тобто АСГ намагнічується ще більше струмом статора. У такому випадку збільшується результуючий потік у зазорі машини і, отже, у міру зростання струму статора індукована ЕРС зростає. Це призводить до збільшення напруги на виході генератора.

Чим вище частота струму ротора (поля збудження), тим жорсткіше зовнішні характеристики і слабкіше залежність напруги статора АСГ від навантаження. Це обумовлюється тим, що при збільшенні частоти струму ротора відбувається більш повна компенсація реакції якоря полем збудження. Синхронні генератори не здатні стійко працювати в режимі глибокого споживання реактивної потужності навіть при наявності регуляторів сильної дії.

Якщо навантаження цілком індуктивне, то зовнішні характеристики АСГ спадні при будь-яких знаках ковзання, що зображено на рисунку 2. Для швидкостей більше синхронної ($s < 0$), жорсткість характеристик вище, ніж у характеристик, побудованих по тим же даним, але з позитивним ковзанням $s > 0$. Це обумовлюється меншою дією по-

току, що розмагнічує, статора (якоря) при швидкостях вище синхронної. Якщо навантаження чисто ємнісне, тобто $\cos \varphi_n = 0$, $\varphi_n < 0$, то зовнішні характеристики генератора будуть зростаючими при будь-яких ковзаннях.

Розглянемо характеристики генерації потужності. Активна потужність статора генератора з урахуванням (7) визначається за формулою

$$P_s = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{U}_s \bar{I}_s^*] = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[(R_n + jX_n) \bar{I}_s \bar{I}_s^*] = \frac{3}{2} [(R_n + jX_n)(I_{su}^2 + I_{sv}^2)] = \frac{3}{2} R_n I_s^2. \quad (11)$$

З виразу струму статора (6) виділяються дійсна і уявна частини множенням знаменника дробу на сполучений комплекс. Після перетворень отримані наступні вирази для проекцій вектора струму статора

$$I_{su} = \frac{X_\mu U_{rv}(sX_\mu^2 + R_r R_\Sigma - sX_r X_\Sigma) - X_\mu U_{ru}(R_r X_\Sigma + sX_r R_\Sigma)}{(sX_\mu^2 + R_r R_\Sigma - sX_r X_\Sigma)^2 + (R_r X_\Sigma + sX_r R_\Sigma)^2}; \quad (12)$$

$$I_{sv} = \frac{-X_\mu U_{ru}(sX_\mu^2 + R_r R_\Sigma - sX_r X_\Sigma) - X_\mu U_{rv}(R_r X_\Sigma + sX_r R_\Sigma)}{(sX_\mu^2 + R_r R_\Sigma - sX_r X_\Sigma)^2 + (R_r X_\Sigma + sX_r R_\Sigma)^2}. \quad (13)$$

По співвідношеннях (11)-(13) будуються залежності потужності, переданої від генератора в навантаження, від струму статора при різних ковзаннях. Залежності активної потужності $p_s(i_s)$ у відносних одиницях ($p_s = P_s/P_n$) представлені на рисунку 3.

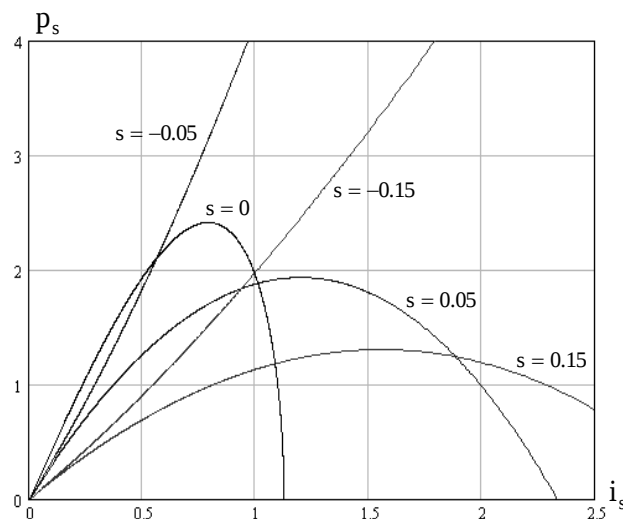


Рисунок 3 – Залежність потужності, що генерується, від струму навантаження при різних частотах збудження АСГ

З графіків видно, що в синхронному режимі ($s=0$) у генератора відбувається різке зниження потужності, що віддається в навантаження, чого не відбувається при ($s \neq 0$) змінній напрузі збудження. Зрив генерації потужності в синхронному режимі обумовлюється різким зниженням напруги статора АСГ через дію потоку якоря, що розмагнічує і, отже, зменшення ЕРС статора. В асинхронному режимі дія струму навантаження (статора), що розмагнічує, призводить до зменшення проти-ЕРС у колі ротора (збудження) і, як наслідок, до збільшення струму збудження при заданому векторі напруги ротора. У цьому виявляється ефект автоматичної компенсації реакції якоря. У синхронному режимі реакція якоря не компенсується, так що результуючий магнітний потік знижується значно швидше, ніж в асинхронному режимі роботи. Тому при

швидкостях нижче синхронної ($s > 0$) екстремум активної потужності, що генерується, досягається при струмах статора помітно перевищуючих таке його значення для синхронної швидкості. При швидкостях вище синхронної напруга на активному навантаженні генератора зростає зі збільшенням струму, а не зменшується, що пов'язано з дією потоку статора, що намагнічує. При цьому екстремум за потужністю відсутній.

Висновки. З аналізу побудованих за запропонованою методикою статичних характеристик АСГ можна зробити наступні висновки. Затрачувана на збудження АСГ потужність в асинхронному режимі більше, ніж у синхронному режимі і збільшується в міру зростання частоти струму ротора. Однак асинхронний режим синхронного генератора забезпечує більшу стійкість перетворення механіч-

ної енергії в електричну, чим традиційний синхронний режим. Це виявляється в більш високій жорсткості зовнішніх характеристик і віддачі більшої потужності в навантаження при струмах статора більше номінального. Зі збільшенням частоти струму ротора збільшується стабільність напруги на затискачах АСГ по відношенню к струму навантаження.

Список літератури:

1. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины, М.: Энергоатомиздат, 1984.— 192с.
2. Ключев О.В., Садовой О.В. Оптимизация энергетических характеристик асинхронного вентильного каскада// Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2016. – Випуск 1(28). – С.73-81.
3. Покровский К. Б., Маврін О. І., Олійник В. П. Статичні характеристики потужного асинхронізованого турбогенератора в асинхронному режимі// Електроенергетичні та електромеханічні системи, Т.2, № 2, 2020, С.54-60.
4. Шайбеков А.Ф., Рогинская Л.Э., Семенов В.В. Электромагнитные процессы в асинхронизированной синхронной машине// Вестник УГАТУ, Т.19, №4(70), 2015, С.72-76.
5. Цапенко В.Н., Ежова Е.В. Исследование рабочих параметров асинхронизированных турбогенераторов с помощью систем компьютерного моделирования// Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Т.12, №1(2), 2010, С. 576-580.
6. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Системи керування асинхронними вентильними каскадами. – Кам'янське: ДДТУ, 2018.– 294с.