

Технічні науки

УДК 62-83:681.513.5

Клюєв Олег Володимирович

кандидат технічних наук,

доцент кафедри Електротехніки і електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет

Kliuiev Oleh

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the

Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Dniprovsk State Technical University

ORCID: 0000-0003-4542-3317

**ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
АСИНХРОНІЗОВАНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
RESEARCH REACTIVE POWER OF ASYNCHRONIZED
SYNCHRONOUS GENERATOR**

Анотація. У статті з рівнянь динаміки машини подвійного живлення (МПЖ) отримані рівняння асинхронізованого синхронного генератора (АСГ) як її різновиду. Потім рівняння динаміки записані для статичного режиму роботи. З них виведені залежності реактивної потужності АСГ від струму ротора в асинхронному режимі при ковзаннях відмінних від нуля. Проведено порівняльний аналіз отриманих характеристик реактивної потужності з аналогічним графіком для синхронного режиму при нульовому ковзанні.

Ключові слова: асинхронізований синхронний генератор, проекції вектора струму ротора, реактивна потужність, ковзання, запас стійкості.

Summary. *In the paper from the general equations of the dynamics of the doubly fed machine (DFM), the equations of the asynchronized synchronous generator (ASG) as its special case are obtained. Then the equations of the dynamics are written for the static operating mode. From them the dependences of the reactive power of the ASG on the rotor current in the asynchronous mode with slips different from zero are derived. A comparative analysis of the obtained characteristics of the reactive power with a similar graph for the synchronous mode with zero slip is carried out.*

Key words: *asynchronized synchronous generator, rotor current vector projections, reactive power, slip, stability margin.*

Постановка задачі. Основна техніко-економічна перевага застосування асинхронізованих синхронних генераторів (АСГ) полягає в забезпеченні стійкої роботи в режимах глибокого споживання реактивної потужності, які характерні для сучасних ліній електропередачі високої напруги. Конструкція ротора з двома обмотками збудження (ОЗ) по ортогональним осям та наявність реверсивних збудників у кожній ОЗ дає можливість у перехідних режимах оптимально орієнтувати магніторушійну силу (МРС) генератора з метою створення максимального гальмуючого електромагнітного моменту. При сильних збуреннях, коли можливості керування обмежені максимальною напругою збудження, оптимальна орієнтація МРС збудження досягається автоматично по командах автоматичного регулювання збудження комбінацією форсування та зняття напруг на ОЗ. Оскільки керування каналом напруги може здійснюватися незалежно від електромеханічного процесу коливань ротора, то в умовах, коли напруга збудження не досягає максимальних значень, можна підвищити якість регулювання напруги на шинах станції. Це, зокрема, сприяє підвищенню динамічної стійкості паралельно працюючих синхронних генераторів і прискорює відновлення нормального

енергопостачання споживачів. У статті [1] обґрунтовується ефективність використання АСГ у суднових системах електропостачання в порівнянні із синхронними машинами для запобігання коливань ротора і підвищення запасу стійкості. У [2] проаналізовані можливості АСГ споживати і генерувати реактивну потужність у мережу при змінній швидкості обертання вала генератора, який приводиться у рух вітровою турбіною.

У даній статті ставиться задача дослідити реактивну потужність АСГ у функції струму ротора при різних кутових швидкостях обертання ротора.

Виклад основного матеріалу. Рівняння узагальненої електричної машини в ортогональних осях u, v мають вигляд [3]:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{s,uv} &= \vec{I}_{s,uv} R_s + \frac{d\vec{\Psi}_{s,uv}}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_{s,uv}; \\ \vec{U}_{r,uv} &= \vec{I}_{r,uv} R_r + \frac{d\vec{\Psi}_{r,uv}}{dt} + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_{r,uv};\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\vec{\Psi}_{s,uv} &= \vec{I}_{s,uv} L_s + \vec{I}_{r,uv} L_m; \\ \vec{\Psi}_{r,uv} &= \vec{I}_{s,uv} L_m + \vec{I}_{r,uv} L_r.\end{aligned}\quad (2)$$

Систему рівнянь (1), (2) можна вважати найбільш загальною математичною моделлю машини подвійного живлення, коли зовнішні напруги прикладаються до обмоток статора і ротора. У залежності від законів керування векторами $\vec{U}_s$ і $\vec{U}_r$ МПЖ може працювати в різних режимах, наприклад, у режимі асинхронного вентильного каскаду, синхронної машини, у режимі асинхронізованої синхронної машини генератором або двигуном зі стійкістю як по куту навантаження, так і по ковзанню.

Розглянемо роботу МПЖ у режимі асинхронізованого синхронного генератора зі стійкістю по куту навантаження і генерацією активної потужності в мережу. Запишемо рівняння (1), (2) в осях координат, орієнтованих за вектором потокозчеплення статора. Опорний вектор напруги статора не розглядаємо, тому що при коротких замиканнях на

статорі цей вектор зникає і стає рівним нулю. Якщо вісь u спрямована за вектором $\vec{\Psi}_s$, то його проекція $\Psi_{sv} = 0$. Тоді рівняння (1), (2) у проекціях на осі координат приймають наступний вигляд:

$$U_{su} = R_s I_{su} + \frac{d\Psi_s}{dt}; \quad U_{sv} = R_s I_{sv} + \omega_k \Psi_s; \quad (3)$$

$$U_{ru} = R_r I_{ru} + \frac{d\Psi_{ru}}{dt} - (\omega_k - \omega) \Psi_{rv}; \quad U_{rv} = R_r I_{rv} + \frac{d\Psi_{rv}}{dt} + (\omega_k - \omega) \Psi_{ru}; \quad (4)$$

$$\Psi_s = L_s I_{su} + L_m I_{ru}; \quad 0 = L_s I_{sv} + L_m I_{rv}; \\ \Psi_{ru} = L_m I_{su} + L_r I_{ru}; \quad \Psi_{rv} = L_m I_{sv} + L_r I_{rv}; \quad (5)$$

$$M_e = -\frac{3}{2} N k_s \Psi_s I_{rv}. \quad (6)$$

Якщо прийняти $R_s = 0$, то в статисти з першого рівняння (3) випливає $U_{su} = 0$. Тоді $U_s = U_{sv}$ і вектор напруги статора $\vec{U}_s$ перпендикулярний вектору потокозчеплення статора $\vec{\Psi}_s$. У сталому режимі з другого рівняння (3) випливає $\Psi_s = U_s / \omega_0$. Підставляємо даний вираз у формулу електромагнітного моменту (6) і одержуємо

$$M_e = -\frac{3 N k_s U_s}{2 \omega_0} I_{rv}. \quad (7)$$

Вираз (7) аналогічний кутовій характеристиці синхронної машини. Однак існує принципова різниця. Активну складову струму ротора I_{rv} в асинхронізованій синхронній машині можна регулювати незалежно від інших змінних. У синхронному режимі цього ефекту досягти не можливо – керованою є тільки амплітуда вектора струму I_f , а не його окремі проекції.

Властивості і характеристики асинхронізованих синхронних машин визначаються характером зміни напруги ротора. Оскільки асинхронізовані синхронні машини мають мінімум дві обмотки збудження, то в цій машині на відміну від синхронної машини існує можливість керування не тільки

амплітудою, але і фазою вектора $\vec{U}_r$, і, отже, амплітудою і фазою вектора струму ротора $\vec{I}_r$.

Будь-яке керування має своєю метою зміну по заданому закону тієї або іншої змінної, що характеризує роботу електричної машини. Цими керованими змінними можуть бути, наприклад, електромагнітний момент, напруга на затискачах статора машини, частота обертання ротора, активна і реактивна потужності машини. В асинхронізованій синхронній машині можливо незалежне, роздільне регулювання складових узагальненого вектора, що характеризує режим роботи машини. Таким вектором при керуванні з боку ротора є струм ротора $\vec{I}_r$. Роздільне регулювання за відповідними законами активної I_{rv} і реактивної складових I_{ru} струму ротора представляє основний принцип керування асинхронізованою машиною. При цьому активний струм I_{rv} при постійній напрузі статора цілком визначає електромагнітний момент за формулою (7) і через рівняння руху – швидкість. Отже, складову струму I_{rv} необхідно регулювати у функції швидкості. Функціональну залежність у каналі активної потужності задає зовнішній регулятор швидкості, якому підпорядкований регулятор активної складової струму ротора I_{rv} .

Реактивна потужність статора МПЖ, якщо не враховувати його активного опору, дорівнює

$$Q_s = \frac{3U_s^2}{2X_s} - \frac{3}{2}k_s U_s I_{ru}. \quad (8)$$

Видно, що при постійній напрузі статора його реактивна потужність визначається тільки реактивною складовою струму ротора I_{ru} . У той же час від балансу реактивної потужності в мережі залежить рівень напруги. Отже, реактивний струм ротора можна регулювати незалежно, формуючи сигнал завдання на вході його регулятора в каналі реактивної потужності.

Також існує можливість регулювати реактивний струм I_{ru} у функції напруги статора, що доцільно, якщо МПЖ працює в генераторному режимі. Тоді в каналі реактивної потужності зовнішньому регулятору модуля напруги статора підпорядкований внутрішній регулятор реактивної складової струму ротора I_{ru} .

У машинах з поздовжньо-поперечним збудженням на обмотки по осях u та v покладаються різні функції. За допомогою обмотки v можна регулювати електромагнітний момент, а обмотки u – реактивну потужність або напругу. З рівнянь (3-6) у сталому режимі, нехтуючи активним опором статора, можна одержати наступний вираз реактивної потужності ротора

$$Q_r = \frac{3}{2} X_\delta s I_{ru}^2 + \frac{3}{2} k_s U_s s I_{ru} + \frac{2X_\delta s P_s^2}{3k_s^2 U_s^2}, \quad (9)$$

де $X_\delta = \omega_0 L_\delta$; $L_\delta = L_{r\sigma} + k_s L_{s\sigma}$ – індуктивність потоків розсіювання статора і ротора; s – ковзання.

Сумарна реактивна потужність утвориться додаванням реактивних потужностей ланцюгів статора (8) і ротора (9):

$$Q'_\Sigma = Q_s + Q_r = \frac{3U_s^2}{2X_s} + \frac{3}{2} X_\delta s I_{ru}^2 - \frac{3}{2} k_s U_s (1-s) I_{ru} + \frac{2X_\delta s P_s^2}{3k_s^2 U_s^2}. \quad (10)$$

В асинхронному режимі активна складова струму ротора дорівнює $I_{rv} = 2P_s / 3k_s U_s$ і збігається з припустимим за умовою стійкості струмом збудження в синхронному режимі роботи. Для порівняння реактивних потужностей МПЖ в асинхронному режимі і синхронної машини можна спочатку побудувати графіки залежності $Q'_\Sigma(I_r)$, де модуль струму ротора визначається за формулою

$$I_r = \sqrt{I_{rv}^2 + I_{ru}^2}. \quad (11)$$

Потім для однакових активних потужностей в одній координатній площині відображаються графіки функції $Q'_\Sigma(I_r)$ при різних ковзаннях і

графік функції $Q_{\Sigma}(I_f)$. Це наочно покаже розходження режимів по реактивній потужності.

На рис. 1, 2 зображені графіки, побудовані за описаною методикою. Суцільною лінією показана крива для синхронної машини з однією обмоткою на роторі. Тому режиму, який відповідає верхній частині кривої, не існує. Суцільна лінія побудована за виразом

$$Q_s = \frac{3U_s^2}{2X_s} - \frac{1}{2} \sqrt{9k_s^2 U_s^2 I_f^2 - 4P_s^2}. \quad (12)$$

Опишемо асинхронний режим роботи АСГ із ковзанням, відмінним від нуля. Точка перегину кривих $Q'_{\Sigma}(I_r)$ відповідає цілком активному струму ротора, коли реактивна складова дорівнює нулю $I_{ru} = 0$. При $I_{ru} > 0$ будується нижня частина кривих, яка показує генерування реактивної потужності в мережу при нарощуванні збудження ротора. У цьому випадку для швидкостей нижче синхронної ($s > 0$) статорне коло віддає реактивну потужність у мережу, а роторне коло її споживає. Якщо швидкість ротора вище синхронної ($s < 0$), то як статорне, так і роторне кола генерують реактивну потужність у мережу. Тому зазначені криві лежать по різні сторони від суцільної лінії, яка показує залежність $Q_{\Sigma}(I_f)$, коли реактивна потужність ротора дорівнює нулю.

Графік $Q'_{\Sigma}(I_r)$ при нульовому ковзанні у своїй нижній частині збігається з графіком $Q_{\Sigma}(I_f)$. Однак крива $Q'_{\Sigma}(I_r)$ продовжується нагору і для синхронної швидкості ($s = 0$), чого неможливо забезпечити за умовами стійкості для синхронної машини з однією обмоткою на роторі.

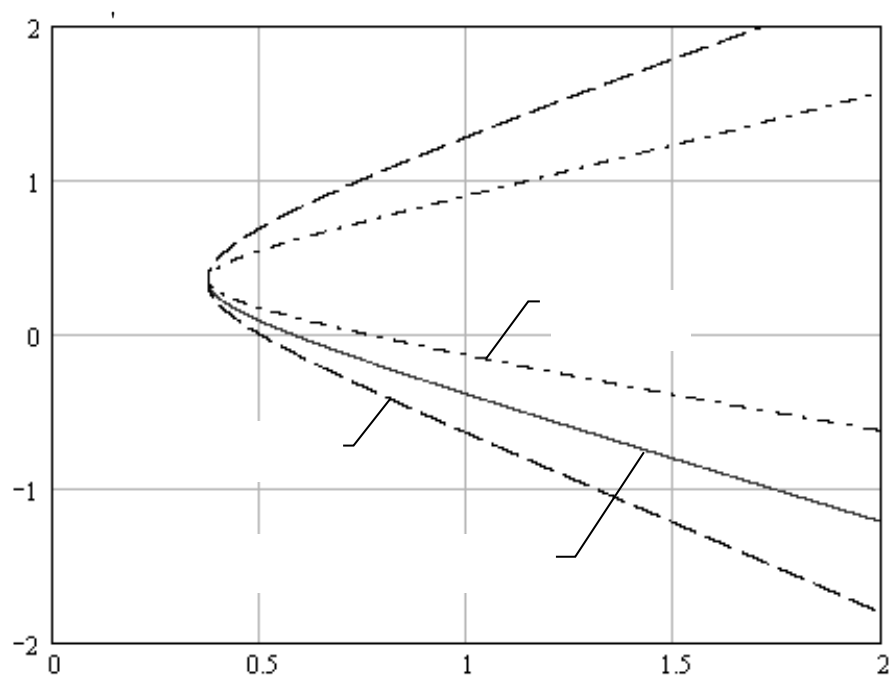


Рис. 1. Залежності сумарної реактивної потужності АСГ від модуля струму ротора при різних ковзаннях і заданій активній потужності

$$p_c = 0.4$$

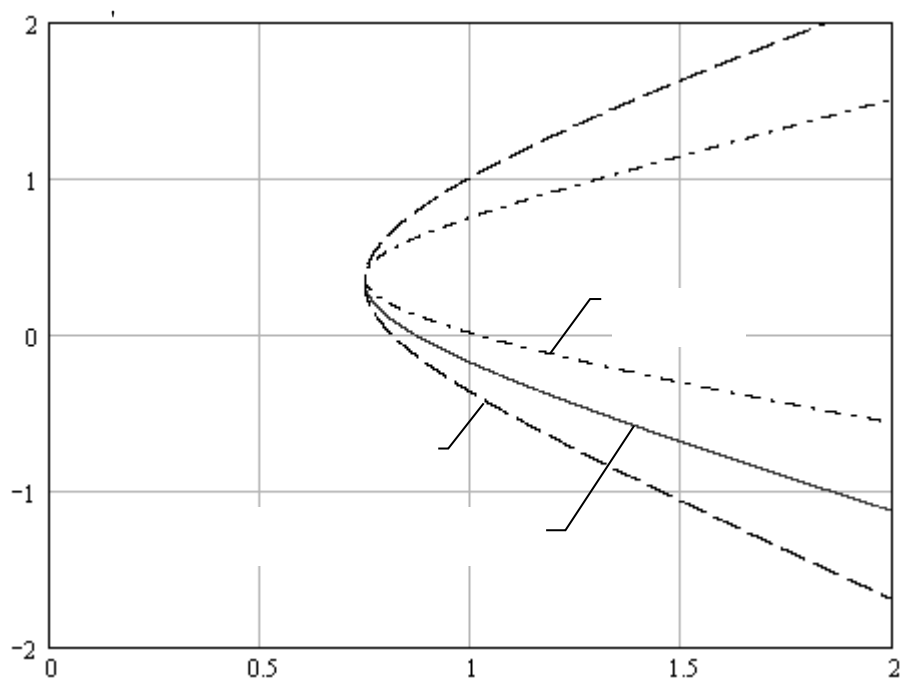


Рис. 2. Залежності сумарної реактивної потужності АСГ від модуля струму ротора при різних ковзаннях і заданій активній потужності

$$p_c = 0.8$$

Верхні частини графіків реалізуються тільки в МПЖ, яка має два канали керування за ротором. Ця ділянка кривих будується при $I_{\text{rn}} < 0$, тобто реактивний струм ротора розмагнічуючий, що приводить до споживання великої кількості реактивної потужності з боку статора АСГ. Верхні ділянки кривих відповідають режиму глибокого споживання реактивної потужності з мережі зі збереженням стійкості АСГ. Можна помітити, що регулюючий ефект вище при негативних ковзаннях, чим при позитивних, тому що ширше розкид гілок графіка.

Висновки. Проведений аналіз показав, що асинхронізована машина у відношенні стійкості має перевагу перед синхронною, яка полягає в тім, що множина її стійких режимів завжди більше такої множини синхронної машини і, у першу чергу, за рахунок усталеної роботи в режимах споживання реактивної потужності. Рівень обмеження активного навантаження незначно залежить від режиму АСГ за реактивною потужністю і вище чим у синхронних аналогів, які у режимі споживання реактивної потужності вимагають значного зниження активного навантаження.

Література

1. Мехтієв Г.А., Ісмаїлов С.С. Особливості використання асинхронізованих синхронних валогенераторів на судах із ГРК. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2019. Вип. 1(28). С. 25-31.
2. Kumar S., Singh O., Aggarwal S. A comparative study for reactive power capability of doubly fed induction generator and synchronous generator. *International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*. 2016. doi: 10.1109/iccccm.2016.7918237.
3. Ключев О. В., Садовой О. В., Сохіна Ю. В. Системи керування асинхронними вентиляними каскадами. Кам'янське: ДДТУ. 2018. 294 с.