

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИНХРОННИ ГЕНЕРАТОРИ – ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД

Васил Димитров

vdimitroff@abv.bg

***ВТУ „Тодор Каблешков“, ул. Гео Милев“ 158, София 1574
БЪЛГАРИЯ***

Ключови думи: синхронни генератори, характеристики

Резюме: Синхронните машини се използват най-често като генератори на трифазно синусоидално напрежение. Намират голямо приложение в електрическите централи и работят паралелно на енергийната система. Предимството им е възможността да генерират реактивна енергия.

Разработен е лабораторен стенд за изпитания на два синхронни генератора. В доклада се разглеждат схемите на свързване и опитните изпитания при снемане на характеристиките им: външна, регулационна, товарна, на празен ход и късо съединение. Направено е сравнение с теоретично изведени зависимости и са оценени качествата на изследваните синхронни генератори.

Стендът се използва за практическо обучение и научноизследователска дейност.

ВЪВЕДЕНИЕ

Работата на синхронния генератор се основава на явлението електромагнитна индукция и се състои в преобразуването на механичната енергия в електрическа променливотокова енергия: постоянноотоковото магнитно поле на ротора се върти и пресича намотките на статора, в който се индуцира електродвижещо напрежение (е.д.н.).

Генераторите се изработват за определени параметри, при които трябва да могат да работят неограничено продължително време с пълен товар. Това е така нареченият нормален режим на работа. Характерни величини са: номинално напрежение, номинална пълна мощност или ток, номинален $\cos\phi$, номинални обороти, допустима температура на нагряване на ротора и статора и др. По-голяма част от синхронните генератори са проектирани за промишлена честота 50 Hz. Като правило работят със смесен товар (активно-индуктивен или активно-капацитивен).

УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СИНХРОННИТЕ ГЕНЕРАТОРИ

Синхронните генератори представляват променливотокови машини, при които котвената намотка (променливотокова) обикновено е разположена в статора (разпределена в каналите на шихтован магнитопровод от листов електротехническа стомана). В ротора (индуктора) се разполага постоянноотокова (възбудителна) намотка.

Тя се захранва чрез система от два контактни пръстена и два комплекта четки. При безконтактните генератори възбудителните намотки се разполагат на лагерните капади, а роторът се изработва със специална конструкция (напр. с ноктообразни полюси). Най-разпространени са трифазните генератори (явнополюсни и неявнополюсни). В транспорта се използва предимно първият вид, тъй като неговите габарити са по-малки. Роторът се върти с постоянна честота n , респективно ъглова скорост Ω , която е равна на синхронната n_1 (Ω_1) [1, 2]:

$$(1) \quad n = n_1; \Omega = \Omega_1$$

В режим на празен ход роторът се върти със синхронната честота, във възбудителната намотка протича постоянен възбудителен ток I_f , но токът I в котвената намотка е нула. Това означава, че постоянният магнитен поток в индуктора при въртенето си създава въртящо се магнитно поле със синхронна честота n . Индукираното от магнитния поток Φ_f (Φ_o) е.д.н. в статорната многофазна намотка е с честота f и ефективна стойност E_o :

$$(2) \quad f = \frac{p \cdot n}{60}, s^{-1} \text{ при } n = n_1, \text{ min}^{-1};$$

$$(3) \quad E_o = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot k_w \cdot \Phi_o,$$

където: p е брой чифтове полюси; w е броят на навивките на статорната променливотокова намотка; k_w е коефициентът на същата намотка; Φ_o е магнитният поток на индуктора, който индукира е.д.н. E_o в статорната намотка при празен ход.

При натоварване на генератора в статорната намотка протича ток I , който се изменя от нула до номиналния работен ток I_N . Магнитното поле, което се получава от протичащия в статорната намотка ток I , се нарича реакция на тока на котвата Φ_a . Тя оказва влияние на работата на генератора, тъй като изменението на магнитното поле на машината води до изменение на индукираното в статорната намотка е.д.н. и до изменение на всички величини, свързани с него. Реакцията на тока на котвата в синхронния генератор при чисто индуктивен товар е надлъжна размагнитваща, а при чисто капацитивен товар – надлъжно-намагнитваща.

Характеристиките на синхронните генератори се получават опитно или изчислително. Те са зависимости между две основни величини в електрическите машини, като останалите параметри се запазват с неизменна стойност [2].

Характеристиката на празен ход показва зависимостта на изходното напрежение U от възбудителния ток I_f без включен товар във веригата на статора:

$$(4) \quad U = f(I_f) \text{ при } I = 0, f = f_N$$

Напрежението на изводите на котвената намотка U се определя от индукираното е.д.н. E_o . Неговите стойности за различни възбудителни токове I_f характеризират магнитната система на синхронния генератор. При $I_f = 0$ обикновено има остатъчен магнитен поток и напрежение $U_{ocm} = \Delta E_o$. Ако при възбуждането на синхронния генератор се получи насищане, то след намаляването на I_f се оформя хистерезисен цикъл.

Характеристиките на късо съединение показват зависимостта на изходния ток I от възбудителния I_f :

$$(5) \quad I = f(I_f) \text{ при } U = 0, f = const.$$

Тези характеристики се получават опитно чрез плавно повишаване на възбудителния ток при късосъединена статорна намотка (трифазно, двуфазно или еднофазно късо съединение), докато статорния ток достигне стойност I_N или най-много $1,2 \cdot I_N$. При този режим синхронният генератор е с ненаситена магнитна система и характеристиките са линейни. Аварийно късо съединение се получава при $I_f = I_{fN}$.

Товарни характеристики са зависимостите на изходното напрежение U от възбудителния ток I_f :

$$(6) \quad U = f(I_f) \text{ при } I = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}, f = \text{const}$$

Характеристиките са аналогични на тези при празен ход, но тук се проявява действието на реакцията на тока на котвата. Нейната надлъжна съставяща може да бъде намагнитваща (при капацитивен характер на товара) или размагнитваща (при индуктивен товар). От тук произтича и разликата в товарните характеристики при капацитивен и индуктивен фактор на мощността $\cos \varphi$ ($\cos \varphi_c$ и $\cos \varphi_i$). Пресечната точка с абсисната ос определя I_f при опит на к.с. със съответната стойност на статорния ток $I_{кс}$.

Външната характеристика е зависимостта на напрежението U от товарния ток I :

$$(7) \quad U = f(I) \text{ при } I_f = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}, n = n_N = \text{const}$$

◆ При активен товар ($\cos \varphi = 1$) нарастването на товарния ток води до намаляване на напрежението U , което се обяснява с увеличаването на пада на напрежение в статорната намотка и усилване на размагнитващото действие, оказано от реакцията на тока на котвата по напречната ос.

◆ При индуктивен товар ($\cos \varphi_i < 1$) с нарастването на товара напрежението намалява по-бързо, тъй като към посочените при активния товар причини се прибавя и въздействието на надлъжната размагнитваща съставяща на реакцията на тока на котвата.

◆ При капацитивен товар ($\cos \varphi_c < 1$) нарастването на товарния ток I е свързано с увеличаване на напрежението U , което се обяснява с нарастването на надлъжната намагнитваща съставяща на реакцията на тока на котвата.

Изменението на напрежението U при намаляване на товара от номиналната му стойност до нула при $I_f = \text{const}$ и $n = \text{const}$ се нарича номинално изменение (повишение) на напрежението ($\Delta U_N\%$):

$$(8) \quad \Delta U_N\% = \frac{E_o - U_N}{U_N} \cdot 100,\%$$

При капацитивен товар на генератора $\Delta U_N\%$ е отрицателно.

Регулационната характеристика показва как трябва да се изменя възбудителният ток при изменение на товара, за да не се изменя напрежението на изводите на генератора:

$$(9) \quad I_f = f(I) \text{ при } U = U_N = \text{const}, n = n_N = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}.$$

◆ При активен товар ($\cos \varphi = 1$) увеличаването на товарния ток I е съпроводено от намаляване на напрежението U и за да се поддържа напрежението U постоянно, трябва да се повишава възбудителният ток I_f .

◆ При индуктивен товар ($\cos \varphi_i < 1$) напрежението U спада по-бързо и за това възбудителният ток I_f , необходим за поддържането на $U = U_N$, трябва да се увеличава повече, отколкото при активен товар.

◆ При капацитивен товар ($\cos \varphi_c < 1$) нарастването на товара води до увеличаване на напрежението U и за да се поддържа $U = U_N$, трябва възбудителният ток I_f да се намалява.

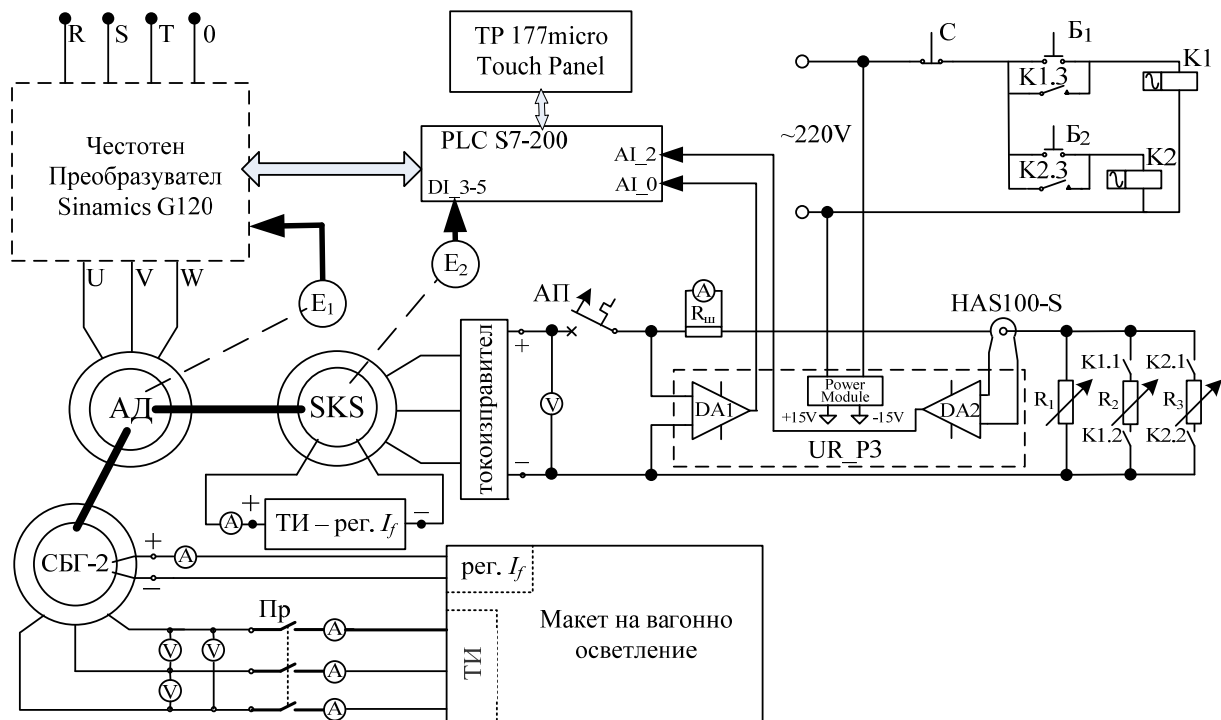
ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД ЗА ИЗПИТАНИЯ НА СИНХРОННИ ГЕНЕРАТОРИ

Разработен е лабораторен стенд [3, 4] за изпитания на синхронен генератор с вграден токоизправител тип SKS 112.1/10.12 и на вагонен безконтактен генератор тип СБГ-2 (фиг. 1). Двете машини се задвижват от асинхронен двигател (АД), като са създадени условия за стабилизация на скоростта на въртене и за промяна на

натоварването. Техническите данни са показани в табл.1. Поддържането на постоянна скорост по време на изпитанията е възможно, тъй като е въведена обратна връзка чрез енкодера E_1 , монтиран на вала на АД, а честотният преобразувател Sinamics G120 предоставя възможност за работа в режим на векторно управление. Обезпечени са условия за безопасно провеждане на изпитанията чрез PLC и система за оценка на момента (датчиците на ток HAS100-S, напрежение UR_P3 и скорост E_2). Генераторът СБГ-2 е свързан с лабораторен макет на вагонно осветление, но може да се изпитва и самостоятелно. Осигурява се допълнително натоварване, както и възбуждане или от регулатора на I_f (включен в макета), или от външен токоизправител.

Таблица 1

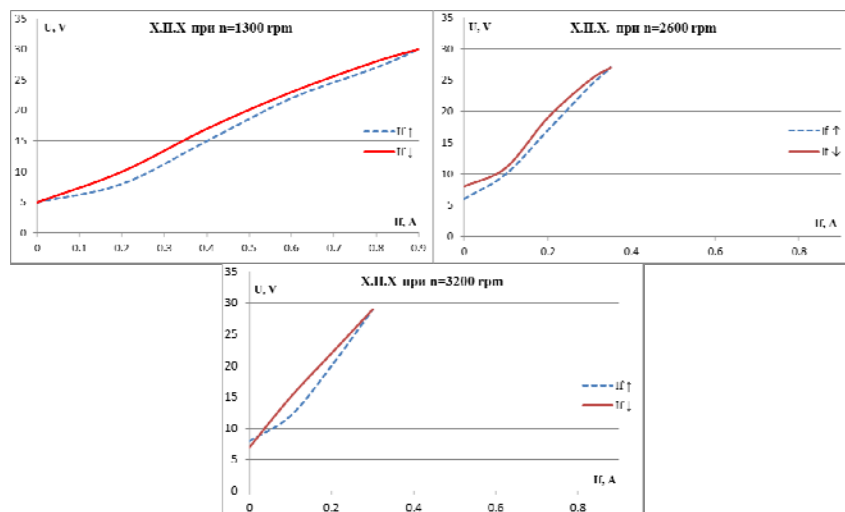
SKS 112.1/10.12		СБГ-2	
Параметър	Стойност	Параметър	Стойност
n	1200 / 6000 min^{-1}	n_{max}	2350 min^{-1}
U	24 / 28 V	U_N	21,6 V
I	50 / 60 A	I_N	105 A
P	1,2 / 1,68 kW	S_N	4 kVA
U_{f-max}	12,5 V	I_{f-max}	4,4 A



Фиг. 1 Схема на лабораторен стенд за изпитания на синхронни генератори

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗПИТАНИЯ

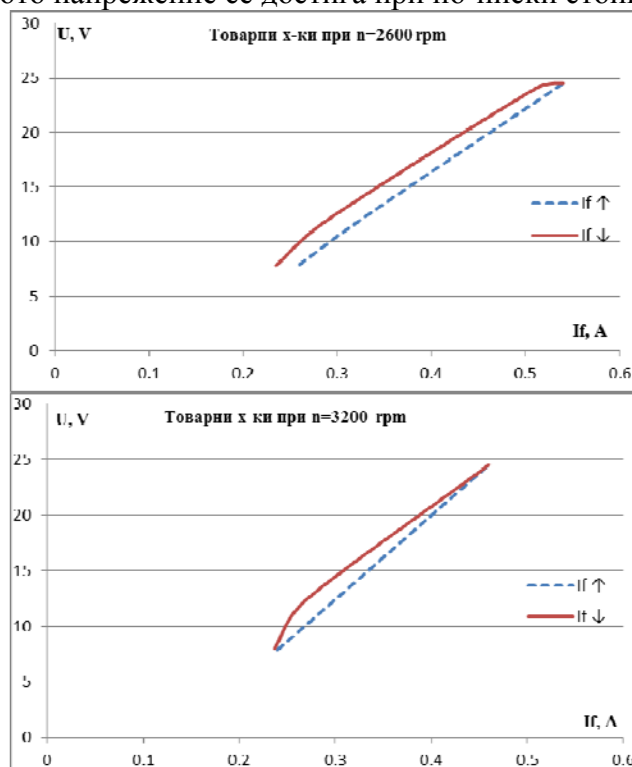
При снемане характеристиката на празен ход (Х.П.Х.) генераторът се развърта с постоянна скорост. При $I_f = 0$ се отчита напрежението от остатъчния магнетизъм. След включване на веригата на възбудителната намотка към регулируем токоизправител се увеличава възбудителният ток I_f от нула до стойност, при която индуктираното напрежение на статорна намотка достигне до $1,1 \cdot U_N$. Снема се и низходящият клон на характеристиката, като се намалява възбудителният ток до нула. Остава да действа напрежението от остатъчния механизъм. Провеждат се изпитания при няколко скорости. Получените характеристики са показани на фиг. 2.



Фиг. 2 Характеристики на празен ход на синхронен генератор тип SKS

От графиките се вижда, че с увеличаване на скоростта номиналното напрежение се достига при по-ниски стойности на възбудителния ток. Забелязва се хистерезис.

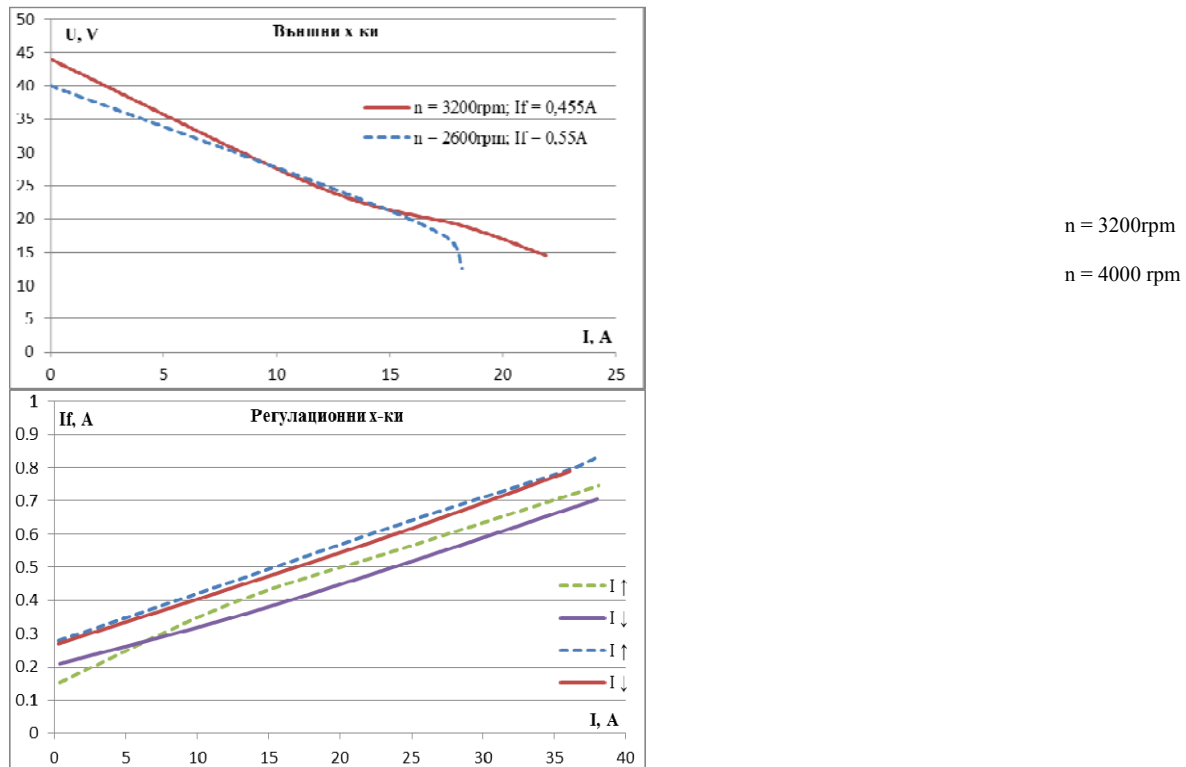
При снемането на товарните характеристики генераторът се развърта с постоянна скорост. Чрез промяна на съпротивлението на реостатите се поддържа се постоянна стойност и на товарния ток I . Посредством регулируем токоизправител се увеличава възбудителният ток I_f от нула до стойност, при която индуктираното напрежение на статорната намотка достигне до $1,1 \cdot U_N$. Снема се и низходящият клон на характеристиката, като се намалява възбудителният ток до нула. Остава да действа напрежението от остатъчния магнетизъм. Провеждат се изпитания при няколко скорости. Режим на късо съединение не е реализиран от съображения за безопасност. Получените характеристики са показани на фиг. 3. Вижда се, че с увеличаване на скоростта номиналното напрежение се достига при по-ниски стойности



Фиг. 3 Товарни характеристики на синхронен генератор тип SKS (при $I = 0,3 \cdot I_N$)

на възбудителния ток I_f . Отново се забелязва хистерезис.

При снемане на външни характеристики генераторът се развърта с постоянна скорост. Чрез регулируем токоизправител се увеличава възбудителният ток I_f до необходимата стойност. При изключен автоматичен прекъсвач АП (т.е. при $I = 0$) се прави първото отчита-не на U (напрежение на празен ход). Включва се АП при максимално съпротивление на товарния реостат. Натоварването на генератора се извършва чрез намаляване на съпротивлението, при което се увеличава токът I . При това напрежението U намалява. Характеристиката е падаща, когато товарът е активен или активно-индуктивен и възходяща при капацитивен товар. Получените характеристики са показани на фиг. 4а.



Фиг. 4 Външни и регулационни характеристики на синхронен генератор тип SKS

При снемане на регулационни характеристики генераторът се развърта с постоянна скорост. Чрез регулируем токоизправител се увеличава възбудителният ток I_f до стойност, при която $U = U_N$. Натоварва се постепенно генераторът чрез намаляване общото съпротивление на реостатите, при което се увеличава токът I , а напрежението U се поддържа постоянно чрез увеличаване на I_f . Характеристиката е възходяща, когато товарът е активен или активно-индуктивен. Получените характеристики са показани на фиг. 4б.

ИЗВОДИ

Предимството на синхронните машини е възможността им да генерират реактивна енергия, поради което намират огромно приложение, особено като генератори. Това налага усиленото изучаване на характеристиките им и на режимите на работа. Разработеният лабораторен стенд създава отлични предпоставки за изпитания на два генератора с различно (често използвано) предназначение. Системата за оценка на момента и програмируемият логически контролер PLC Simatic S7-200 гарантират безопасността при работа и недопускане на аварийни режими. Проведените

изследвания и получените характеристики доказват теоретично изведените зависимости. Изпитаният генератор SKS, обаче, е със сравнително голям хистерезис и много стръмна външна характеристика, т.е. не може да се разчита на стабилно изходно напрежение при голямо и променливо натоварване и липса на регулатор.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Минчева М.С., Електромеханични устройства, учебник, София, 2008
- [2] Миленов И., С. Давидов, Ч. Джамбазки, Ръководство за лабораторни упражнения по електрически машини, ВТУ „Т. Каблешков“, София.)
- [3] Dimitrov, V.D., Examination of Frequency Controlled Asynchronous Drives at Variable Load Torque – Laboratory Simulator, Proceedings of XLVII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2012, Veliko Tarnovo, Bulgaria, 28-30 June 2012, ISBN: 978-619-167-002-4, Vol. II, pp.567-570
- [4] Dimitrov, V.D., Indirect identification of the disturbances by programmable logic controller Simatic S7-200, Proceedings of XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2011, Nis, Serbia, June 29 – July 1, 2011, ISBN: 978-86-6125-033-0, Vol. III, pp.1018-1021.

SYNCHRONOUS GENERATORS EXAMINATIONS – LABORATORY STAND

Vasil Dimitrov
vdimitroff@abv.bg

*Todor Kableshkov University of Transport,
158 Geo Milev Str., Sofia 1574,
BULGARIA*

Key words: *Synchronous generators, characteristics*

Abstract: *Synchronous machines are often used as generators of three-phase sinusoidal voltage. They have great application in power stations and work alongside the energy system. Their advantage is the ability to generate reactive power.*

A laboratory stand is developed and gives many possibilities of examinations of two synchronous generators. In this paper, some wiring diagrams and experimental tests on their characteristics are examined: external, regulatory, loading, idling and short circuits. A comparison with theoretically deduced relationships and obtained results is made. The quality of the studied synchronous generators is assessed.

The stand is used for practical training and research.