

**ИЗПИТАТЕЛЕН СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАБОТАТА НА
АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ В ГЕНЕРАТОРЕН РЕЖИМ**

**TESTING STAND FOR RESEARCH ON INDUCTION MOTOR OPERATION
IN GENERATOR MODE**

Lyubomir Dimitrov

Technical University – Gabrovo, Bulgaria

Svilen Rachev

Technical University – Gabrovo, Bulgaria

Dimitrina Koeva

Technical University – Gabrovo, Bulgaria

Abstract

There is well-known a widespread use of induction motors in practice. Due to their simple construction, relatively small size dimensions, attributed to a unit of power, easy to operate in operating conditions, low prices and the principle of reversibility of rotating electric machines, they have also been used as asynchronous generators. In this connection, a stand has been developed to study their particularities in working conditions, which would help to familiarize with the operation of low-power generator systems.

Keywords: induction motor, frequency inverter, asynchronous generator

ВЪВЕДЕНИЕ

Асинхронният генератор (АГ) се прилага често поради простата и надеждна конструкция и лесно включване към електрическата мрежа. Той не изисква синхронизация, защото честотата на отдавания от него ток не зависи от скоростта на ротора му. Поради това включването може лесно да се автоматизира или да се извършва от нискоквалифициран персонал. Освен това токът му на късо съединение е по-малък, отколкото при синхронните генератори, поради по-голямото разсейване [1]. Намира приложение в малки водно-електрически централи, ветрогенератори и автономни източници на електрическа енергия с промишлена честота (агрегати и дизел-генератори). Икономическата обосновка сочи, че този режим на работа на асинхронния двигател е подходящ също и в случаите, когато електрическата машина се използва ограничено време за генериране на електроенергия. Към това следва да се добави и непретенциозността на някои битови консуматори (отоплителни, осветителни уреди и пр.) към стойността на захранващото напрежение и

честотата му, а също и случаят, ако генерираната мощност се използва за изпомпване на вода [2].

Асинхронната машина (АМ) работи в генераторен режим, когато преобразува механичната енергия в електрическа, при условие че: роторът се върти по-бързо от статорното магнитно поле на машината (т.е., при отрицателно хлъзгане $-\infty < s < 0$) и да има възможност да консумира индуктивен ток от независим източник или електрическата мрежа, на която ще отдава активна електрическа енергия (т.е. в електрическата мрежа да има източник на индуктивна енергия) [1]. Машината се задвижва от първичен източник на механична енергия, като $n > n_1$, т.е., честотата на въртене на ротора може да се изменя в границите $n_1 \div +\infty$. На практика много големи честоти на въртене над n_1 не следва да се допускат, т.к. се увеличават загубите в стоманата, механичните загуби и загряването – така се намалява к.п.д. на електрическата машината. Ето защо и в генераторен режим АМ работи с хлъзгания, които по абсолютна стойност са като тези в двигателен режим.

При $U = const.$ и $f = const.$ резултатният магнитен поток е почти постоянен по големина и се върти в пространството със синхронна честота на въртене n_1 . Спрямо ротора обаче той се върти в посока, обратна на тази при двигател, поради което се изменя знакът на индуктираното в роторната намотка е.д.н.: $E_{2s} = -sE_2$ [3].

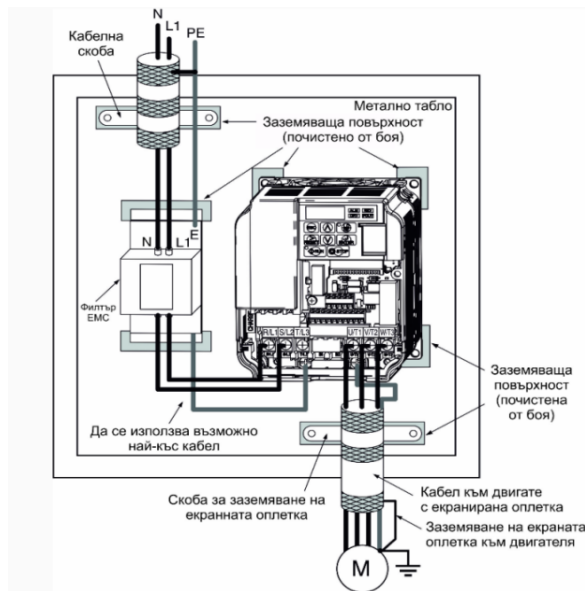
ИЗЛОЖЕНИЕ

За изследване на работата на асинхронен двигател в генераторен режим е изработен стенд, включващ първичен източник на механична мощност – асинхронен двигател АТ 90S2 с технически данни: номинална мощност $P_2 = 1.5$ kW, номинална честота на въртене: $n_H = 2830$ min⁻¹, номинално напрежение: $U_H = 380$ V, номинален ток: $I_H = 3.5$ A, $\cos \varphi = 0.82$, режим на работа: S1.

За регулиране на честотата на въртене на първичния двигател се използва честотен преобразувател на фирмата "OMRON" SysDrive, модел: 3G3EV, с технически данни: захранващо напрежение: $U_{захр.} = 200 \div 240$ V, честота на захранващото напрежение: $f = 50 \div 60$ Hz, изходно напрежение: $U_{изх.} = 0 \div 240$ V, честота на изходното напрежение: $f = 0 \div 400$ Hz, номинален ток: $I_H = 7.0$ A. Схема на свързване на честотния преобразувател е дадена на фиг. 1.

Използваната асинхронна машина за работа в генераторен режим има следните технически данни: тип АТ 90S4 IMB3, номинална мощност: $P_2 = 1.1$ kW, номинално напрежение: $U_H = 380$ V; статорна намотка свързана в звезда; номинална честота на въртене: $n_H = 1400$ min⁻¹; номинален ток: $I_H = 2.9$ A; $\cos \varphi = 0,75$, режим на работа: S1; активно съпротивление на статорната намотка: $r_1 = 7.6$ Ω ; индуктивно съпротивление на разсейване на статорната намотка: $x_1 = 5.3$ Ω ; приведено активно съпротивление на ротора $r_2' = 3.19$ Ω ; индуктивно съпротивление на роторната намотка, приведено към статорната намотка

$x_2' = 5.86$ Ω ; активно съпротивление на намагнитващия контур: $r_{\mu} = 13.24$ Ω ; индуктивно съпротивление на намагнитващия контур: $x_{\mu} = 226.3$ Ω ;



Фиг. 1. Схема на свързване на честотния преобразувател.

За опростяване на изследванията се приема, че параметрите на заместващата схема r_1 , x_1 , r_2' , x_2' са инвариантни. За всеки конкретен случай на натоварване капацитетът на възбуждане считаме за постоянен. Условието за устойчива работа при $x_C = const.$ е генераторът да работи с голямо насищане на магнитната верига [3].

За възбуждане на асинхронния генератор се използват кондензатори, като при въртене на ротора в АГ се индуктира малко е.д.н. $E_{ост.}$ от остатъчното магнитно поле. Под въздействие на това е.д.н. протича ток, който в кондензаторите сменя знака си и изпреварва по фаза е.д.н. с 90 електрически градуса. Кондензаторите стават източници на индуктивен ток за асинхронния генератор. От този ток е.д.н. на генератора се увеличава още, също така и протичащият ток. Е.д.н. нараства, докато позволява капацитетът на кондензаторите или докато се насити магнитопроводът на машината [1].

Стойността на необходимия капацитет на една фаза е:

$$Q_k = 3\omega CU_l^2, [\text{VAR}] \quad (2)$$

където: $\omega = 2\pi f$ – кръгова честота на захранващата мрежа;

U_l – линейно напрежение, [V];

След преобразуване се получава:

$$C = \frac{Q_k}{3\omega U_l^2} \quad (3)$$

Необходима кондензаторна мощност:

$$Q_k = \frac{I_\mu}{I_H} P_H \quad (4)$$

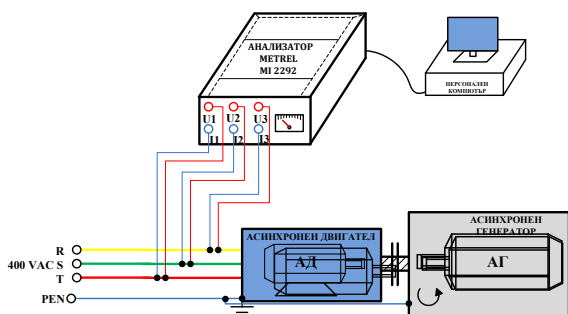
където: I_μ – намагнитващ ток, [A];

I_H – номинален ток, [A].

За възбуждане на магнитния поток за една фаза кондензаторът има капацитет:

$$C = \frac{440}{2\pi \times 50 \times 380^2} = 9.70 \text{ } [\mu\text{F}] \quad (5)$$

При избрани кондензатори $C=10 \mu\text{F}$ за всяка фаза, реактивната мощност е: $Q=440 \text{ VAR}$. Ако се допусне пад на напрежение до 10% от номиналното, може да се определи необходимата допълнителна реактивна мощност, т.е. точната стойност на кондензатора [3].



Фиг. 2. Принципно схемата на свързване.

За реализиране на изследванията е използван анализатор на качеството на електрическата енергия METREL, модел: *Power Quality Analyser – Plus MI 2292*, явяващ се цифрово портативно мултифункционално устройство за измерване и анализ на трифазни електрически вериги. Възможни са

измервания с висока точност, запис и представяне на електрическите величини в реално време.

Принципна схема на свързване на анализатора е дадена на фиг. 2, а на фиг. 3 – общ вид на изпитателния стенд.

Анализаторът на качество на електрическата енергия METREL изчислява коефициентите на хармониците (на общи нелинейни изкривявания – THD от Total Harmonic Distortion) на напрежението THD-U(%) и на тока THD-I(%) за всяка фаза, както и коефициента на мощността по фази и общо за двигателя.



Фиг. 3. Изпитателен стенд – общ вид.

Изследвана е работата на АГ за различни случаи. По време на опитите наблюдаваните и визуализирани данни за трите фази са: осцилограма на тока – I_{RMS} , напрежението – U_{RMS} , активна мощност – P_{RMS} , реактивна мощност – Q_{RMS} , пълна мощност – S_{RMS} , коефициент на мощност – PF , %-ндял на проявените хармоници в кривите на напрежението и тока, честота на генерираното напрежение – f .

Анализ на качеството на електрическата енергия при активен товар.

В този случай генераторът захранва чисто активен товар – лампи с нажежаема жичка ($P_H=180 \text{ W}$). На фиг. 4 са представени данни за наблюдаваните величини. Получените графични зависимости на трите фазни напрежения и токове, показват изменението на тези величини във времето. Забелязва се силно изкривяване спрямо

идеалните синусоидите на трите тока, докато при напреженията това е в твърде малки граници и не оказва съществено влияние върху работата на включения товар.

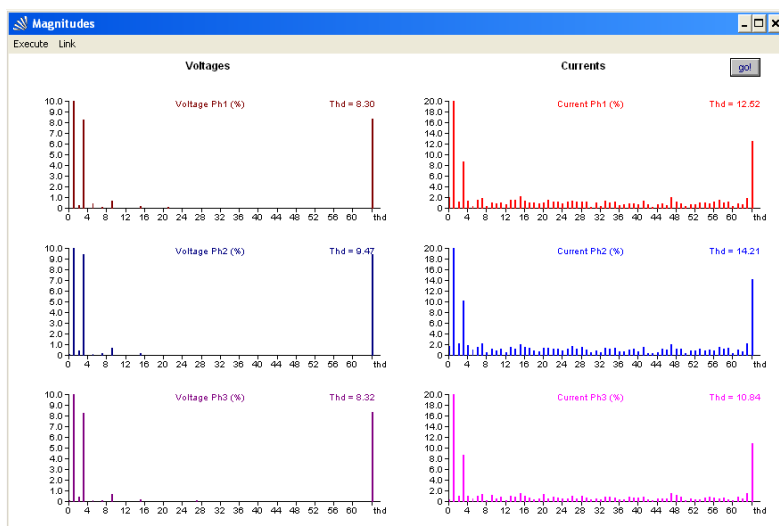
От получените таблични резултати става ясно, че трите фази са равномерно натоварени по отношение на стойностите на трите тока. Коефициентът на мощност – PF (използва се този термин, т.к. е отчетено влиянието на висшите хармоници в електрическата мрежа) е с капацитивен характер $PF_{(c)} = (0,987 \div 0,990)$, което показва, че асинхронният генератор генерира реактивна мощност. Това се дължи до голяма степен на малката мощност на товара и невъзмож-

ност за регулиране на възбудането на АГ. На фиг. 5 е представен хармоничният анализ на напреженията и токовете за трите фази. Честотата на генерираното напрежение е 51,09 Hz. В кривите на напреженията за всяка фаза ясно се открояват хармоници с поредни номера $v=3, v=5, v=9$. В кривите на токовете се наблюдава проявяване на хармоници с поредни номера $v=3, v=5, v=9, v=15$, като другите са по-слабо изразени.

Общото хармонично изкривяване на напрежението е в границите: $THD-U(\%) = 8,30 \div 9,47$, докато на тока варира от: $THD-I(\%) = 10,84 \div 14,21$.



Фиг. 4. Данни от изследване на АГ при активен товар



Фиг. 5. Хармоничен анализ при активен товар

Анализ на качеството на електрическата енергия при активно-индуктивен товар.

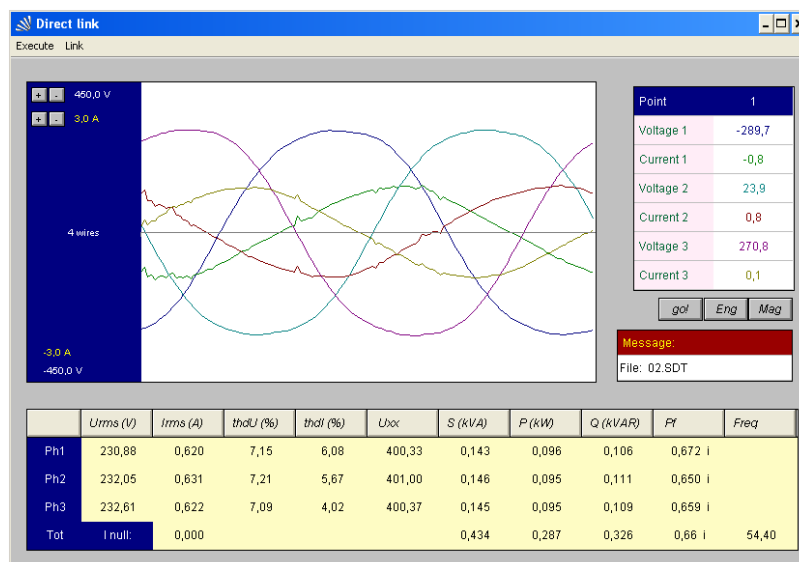
В този случай генераторът захранва активно-индуктивен товар $R-L$. Като товар се

използва асинхронен двигател с малка мощност и нажежаеми лампи с обща мощност: $P_H = 360 \text{ W}$. Отчетени са ниски стойности на PF , поради характера на товара – празен ход на електродвигателя, явяващ се

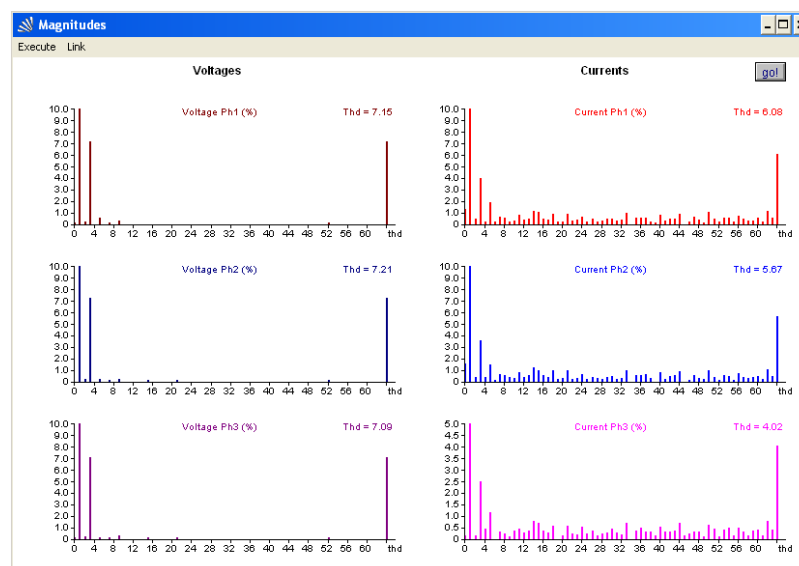
товар. На фиг. 6 са представени данни за наблюдаваните величини, а на фиг. 7 – хармоничният анализ. И в този случай в кривите на напреженията и токовете се открояват хармоници с поредни номера $v=3$, $v=5$, но общото хармонично изкривяване е в по-малък диапазон – $7,09\div 7,15$ при напрежението и $4,02\%\div 6,08\%$ при тока.

При работа на АГ с активно–индуктивен товар реактивната мощност на конден-

заторната батерия осигурява реактивната мощност за основното магнитно поле (Q_M), полето на разсейване (Q_S) и реактивната мощност, консумирана от товара (Q_T). Или балансът на реактивните мощности е условие за устойчива работа на АГ. В едната фаза се наблюдава несиметрия, вероятно поради несиметрия на товара.



Фиг. 6. Данни от изследване на АГ при активно-индуктивен товар



Фиг. 7. Хармоничен анализ при активно-индуктивен товар

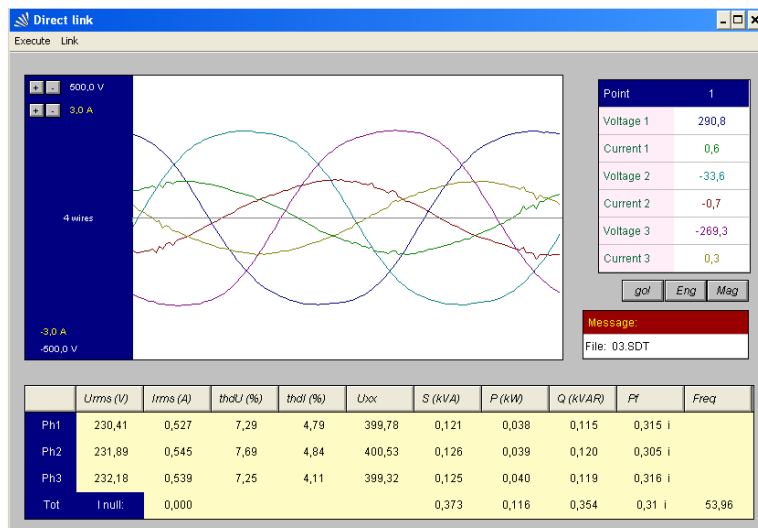
Анализ на качеството на електрическата енергия при индуктивен товар.

В този случай генераторът захранва индуктивен товар – асинхронен двигател, работещ на празен ход с мощност $P_H = 180W$. На фиг. 8 са представени данни за наблюда-

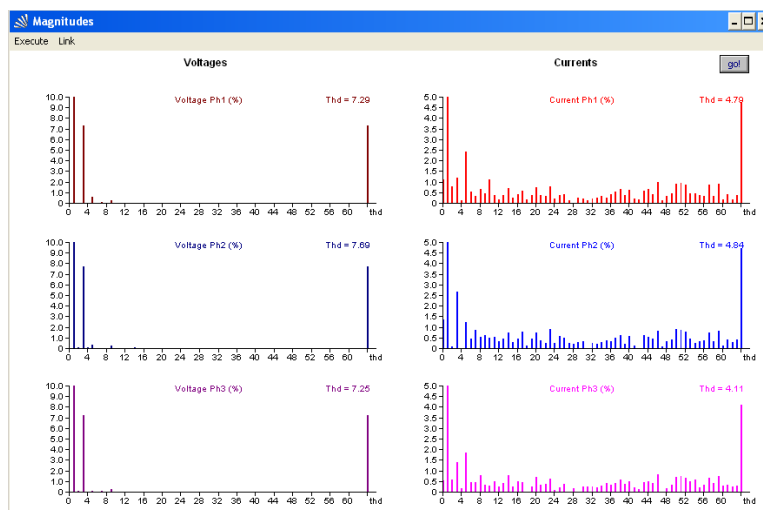
ваните величини, а на фиг. 9 – хармоничният анализ на напреженията и токовете за трите фази. Честотата на генерираното напрежение е 53,96 Hz. Това е следствие на честотата на въртене на АГ, т.к. при по-ниска честота напрежението

на изводите на генератора се понижава под номиналното (230 V) и се налага честотата на въртене да се повиши. И в този случай най-силно изразени са хармониците с поредни номера $v=3$, $v=5$. Коефициентът на мощност е с много ниски

стойности по фази: $PF_{(i)} = 0,305 \div 0,316$, което се дължи на малката мощност на включения към АГ товар. Индуктивният характер на коефициента на мощност в този случай е вследствие на индуктивния характер на товара.



Фиг. 8. Данни от изследване на АГ при индуктивен товар



Фиг. 9. Хармоничен анализ при несиметричен товар

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализираният изпитателен стенд допринася за получаване на подробни резултати за работата на асинхронния генератор при различен характер на товара. Ако товарът не е чисто активен, т.е. съдържа реактивни елементи, са необходими допълнителни изчисления, с оглед нормалното генериране на необходимото напрежение. Направеният анализ на качеството на генерираната електрическа енергия е принос от приложен характер за подобряване на електрическите показатели при въвеждане в експлоатация на автономни или свързани

към електрическата мрежа асинхронни генератори.

REFERENCE

- [1] Kopilov I. P., *Electrical Machines*, Logos, Moscow, 2000. (in Russian).
- [2] McPherson G., and Laramore, R. D., *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*, New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1990, pp. 304–315.
- [3] Koeva D., *Automated system for control, monitoring and diagnostics of wind turbines*, PhD Thesis, Technical University - Sofia, Sofia, Bulgaria, 2014. (in Bulgarian).