

ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТАТА НА ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С КАФЕЗЕН РОТОР, РАБОТЕЩ В МОНОФАЗНА МРЕЖА

Гл. ас. д-р инж. Христиан Панчев

Технически университет - Варна

Резюме: В настоящата публикация са представени теоретичните и експерименталните изследвания на трифазен асинхронен двигател с накъсо съединен ротор при захранване от еднофазна променливотокова мрежа. Анализирани са основните схеми на свързване с фазоизместващи кондензатори. Изследвано е влиянието на магнитната асиметрия и обратното въртящо се магнитно поле върху енергийните показатели на машината. Извършен е анализ на показателите на електрическата енергия съгласно стандарта IEEE 1459-2010 в три основни режима на работа: празен ход, двигателен режим под товар и генераторен режим със самовъзбуждане. Формулирани са препоръки за избор на капацитета на работния и пусковия кондензатор с цел минимизиране на загубите и подобряване на коефициента на полезно действие.

Ключови думи: трифазен асинхронен двигател, еднофазна мрежа, фазоизместващ кондензатор, IEEE 1459-2010, генераторен режим, асиметрия.

INVESTIGATION OF THE OPERATION OF A THREE-PHASE SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR CONNECTED TO A SINGLE- PHASE SUPPLY

Assoc. Prof. Dr. Eng. Hristian Panchev

Technical University - Varna

Abstract: This paper presents theoretical and experimental studies of a three-phase squirrel-cage induction motor powered by a single-phase AC grid. The main connection schemes utilizing phase-shifting capacitors are analyzed. The influence of magnetic asymmetry and the counter-rotating magnetic field on the machine's energy performance is investigated. An analysis of electrical energy parameters is conducted in accordance with the IEEE 1459-2010 standard across three primary operating modes: no-load, motoring under load, and self-excited generating mode. Recommendations are formulated for selecting the capacitance values of the run and start capacitors to minimize losses and improve efficiency.

Keywords: three-phase induction motor, single-phase grid, phase-shifting capacitor, IEEE 1459-2010, generator mode, asymmetry.

1. Въведение

Трифазните асинхронни двигатели са основен вид електрическо задвижване поради простата си конструкция, високата надеждност и ограничените изисквания за обслужване. В редица малки работилници, селскостопански обекти и битови приложения обаче е налична само монофазна мрежа. Използването на трифазен двигател в такава мрежа е възможно чрез фазоизместващ кондензатор, но води до несиметрично натоварване на намотките, по-ниска използвана мощност и по-неблагоприятен топлинен режим [1-4].

Целта на изследването е да се оцени работата на трифазен асинхронен двигател с кафежен ротор при монофазно захранване в двигателен режим, на празен ход и в генераторен режим. Проследени са механичната характеристика, посоката на активния енергиен поток, неактивната мощност, факторът на мощността и хармоничният състав на напрежението и тока. Обработката на електрическите величини следва дефинициите на IEEE 1459 [5].

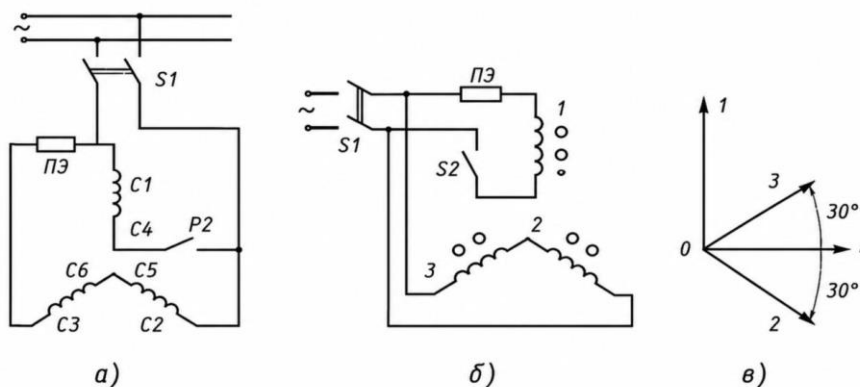
2. Теоретични предпоставки

При симетрично трифазно захранване токовете в статорните намотки са отместени на 120 електрически градуса и създават кръгово въртящо се магнитно поле. При директно монофазно включване полето е пулсиращо и не осигурява начален въртящ момент. Кондензаторът измества фазата на тока в една от намотките и формира елиптично поле, достатъчно за пуск и работа на машината. Полето остава несиметрично, поради което режимът не е еквивалентен на номинално трифазно захранване [2-4].

2.1. Създаване на пусков момент чрез фазоизместващ елемент

За да се получи пусков момент в еднофазна мрежа, трябва да се създадат две магнитодвижещи сили, изместени една спрямо друга в пространството и във времето. Пространственото изместване се получава от разположението на статорните намотки, а времеовото изместване се създава чрез фазоизместващ елемент.

Като фазоизместващ елемент могат да се използват активно съпротивление, индуктивност или кондензатор. Най-добри пускови показатели се получават при използване на кондензатор, защото той позволява по-голямо фазово изместване между токовете и по-близко до кръгово въртящо се поле.



Фиг. 1. Пускова схема с главна и пускова намотка

Пускането се извършва чрез включване на двигателя към мрежата заедно с пусковия елемент. След достигане на скорост, близка до работната, пусковият елемент или пусковият кондензатор се изключва. Ако се използва само работен кондензатор, той остава включен през целия режим на работа.

2.2. Работа на трифазен асинхронен двигател в еднофазна мрежа

Трифазният асинхронен двигател, работещ от еднофазна мрежа с включен кондензатор в една от статорните вериги, се нарича кондензаторен двигател. Той запазва конструктивните предимства на трифазния двигател с късосоединен ротор, но се захранва от двупроводна мрежа.

В сравнение с обикновеното еднофазно включване без кондензатор кондензаторният двигател развива по-голяма полезна мощност. Според литературните източници при правилно избрана схема и подходящо определена капацитивност полезната мощност може да достигне приблизително 65–85 % от номиналната трифазна мощност.

фактора на мощност може да стане висок, защото част от реактивната мощност, необходима за създаване на магнитното поле, се осигурява от кондензатора. Това намалява тока, взет от мрежата, и подобрява енергийните показатели.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

където:

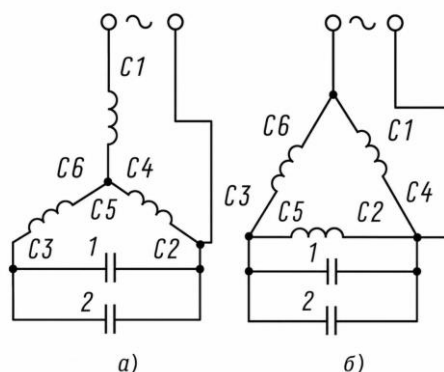
- η – коефициент на полезно действие;
- P_2 – полезна мощност на вала;
- P_1 – активна мощност, потребена от мрежата.

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q^2} \quad (2)$$

където:

- S – пълна мощност;
- P_1 – активна мощност;
- Q – реактивна мощност.

2.3. Основни схеми на свързване



Фиг. 2. Основни схеми на свързване на трифазен асинхронен двигател към еднофазна мрежа с кондензатор.

Схема 2.а – свързване в звезда

При тази схема статорните намотки са свързани в звезда. Еднофазното напрежение се подава към два извода на двигателя, а кондензаторът се включва към третата фаза. Схемата е подходяща, когато данните на двигателя и напрежението на мрежата позволяват всяка намотка да бъде под напрежение, равно или близко до номиналното. При тази схема работният капацитет се изчислява с коефициент 2800.

Схема 2.б – свързване в триъгълник

При тази схема трите статорни намотки образуват затворен триъгълник. Мрежовото напрежение се подава към два от върховете на триъгълника, а кондензаторната верига е свързана към третия извод. Тази схема е често приложима при двигатели 230/380 V, когато се работи от еднофазна мрежа 230 V. За нея работният капацитет се изчислява с коефициент 4800.

2.4. Изчисляване на работния кондензатор

Работният кондензатор C_p остава включен през целия работен режим. Той се избира така, че при номинално натоварване токовете в статорните намотки да бъдат близки до номиналните стойности. За честота 50 Hz в литературата са дадени следните практически зависимости:

$$C_p = \frac{2800 \cdot I_{\text{ном}}}{U} \quad (3)$$

за схема 9а, където:

- C_p – работен капацитет, μF ;
- $I_{\text{ном}}$ – номинален ток, A;
- U – напрежение на еднофазната мрежа, V.

$$C_p = \frac{4800 \cdot I_{\text{ном}}}{U} \quad (4)$$

за схема 9б, където:

- C_p – работен капацитет, μF ;
- $I_{\text{ном}}$ – номинален ток, A;
- U – напрежение на еднофазната мрежа, V.

Важно е да се отбележи, че пълна симетрия на напреженията и токовете не се постига. Въпреки това за всяка схема съществува определена работен капацитет, при която отклоненията на токовете от номиналните стойности са сравнително малки.

2.5. Изчисляване на пусковия кондензатор

Пусковият кондензатор C_0 се включва паралелно или допълнително към работния кондензатор само за времето на пускане. Неговата задача е да увеличи тока в кондензаторната намотка и да създаде по-голям начален въртящ момент.

Ако двигателят се пуска без товар, пусковият капацитет може да бъде равен на работната. Когато е необходим пусков момент, близък до номиналния при трифазно включване, общата пусков капацитет се приема приблизително два до три пъти по-голяма от работната.

$$C_{\text{п}} = C_p + C_0 \quad (5)$$

където:

- C_{π} – обща пускова капацитивност;
- C_p – работен кондензатор;
- C_0 – допълнителен пусков кондензатор.

$$C_{\pi} \approx (2 \div 3) \cdot C_p \quad (6)$$

Практическа зависимост при пуск под товар или при необходим по-голям пусков момент.

$$C_0 = C_{\pi} - C_p \quad (7)$$

По тази формула се намира само допълнителният пусков кондензатор.

Пусковият кондензатор задължително се изключва след развъртането на двигателя. За изключването може да се използва бутон, центробежен изключвател, реле или магнитен пускател с помощни контакти.

2.6.Избор на кондензатор по напрежение

Кондензаторът не се избира само по капацитет. Той трябва да бъде избран и по допустимо работно напрежение. Напрежението върху кондензатора може да бъде по-високо от мрежовото, особено при празен ход или при схеми, при които кондензаторът е включен в такава верига, че върху него се получава повишено напрежение.

При намаляване на товара напрежението върху кондензатора се увеличава и при празен ход може да достигне около 1,2–1,25 от стойността при номинален режим. Затова номиналното напрежение на кондензатора за променлив ток трябва да бъде равно или по-голямо от разчетното.

$$X_c = \frac{10^6}{2\pi f C} \quad (8)$$

където:

- X_c – капацитивно съпротивление, Ω ;
- f – честота на захранващото напрежение, Hz;
- C – капацитет на кондензатора, μF .

$$U_{k,p=1,15} \cdot U \quad (9)$$

където:

- $U_{k,p}$ – разчетно напрежение на кондензатора;
- U – напрежение на еднофазната мрежа.

Особеностите на магнитното поле определят поведението на трифазния асинхронен двигател при еднофазно захранване. При нормална трифазна работа се създава кръгово въртящо се магнитно поле, което осигурява равномерен въртящ момент и добри енергийни показатели. При еднофазно включване полето става пулсиращо или елиптично. Пулсиращото поле може да се разглежда като съставено от право и обратно поле. Правото поле създава полезен въртящ момент, а обратното поле създава спирачен момент.

В резултат на действието на обратното поле двигателят няма начален пусков момент при директно еднофазно включване, работният момент намалява, приплъзването и токът се увеличават, а допустимото натоварване се понижава. Енергийните

характеристики също се влошават: КПД намалява поради увеличени загуби, а коефициентът на мощност се понижава поради увеличена реактивна съставка на тока.

Използването на кондензатор подобрява тези условия, защото създава фазово изместване между токовете в намотките и доближава магнитното поле до кръгово въртящо се. Така се повишава пусковият и работният момент, намалява неблагоприятното действие на обратното поле и се подобряват механичните и енергийните показатели на двигателя.

3. Изследване на асинхронен двигател

При изследвания трифазен асинхронен двигател с кафежен ротор, работещ в монофазна мрежа чрез работен и пусков кондензатор, концепциите на IEEE-1459-2010 са особено приложими. Причината е, че този тип захранване създава условия за несиметрични токове в статорните намотки, фазово изместване между токовете и напреженията и поява на хармонични съставки в тока.

Използването на анализатора Metrel MI 2885 Master Q4 позволява да бъдат измерени не само основните електрически величини, но и хармоничният състав, общото хармонично изкривяване, фазовите диаграми и компонентите на мощността. Това дава възможност за по-пълна оценка на работата на двигателя при двигателен режим, генераторен режим и режим на празен ход.

В двигателен режим основният енергиен показател е активната мощност P , която се преобразува в механична мощност на вала. При генераторен режим знакът на активната мощност се променя, което показва отдаване на електрическа енергия към мрежата. Реактивната и неактивната мощност показват степента на електромагнитен обмен и влошаване на енергийния процес, а хармоничните показатели дават информация за качеството на напрежението и тока.

При монофазно захранване на трифазен асинхронен двигател несиметрията е неизбежна, защото статорните намотки не се захранват от три идеално симетрични фазови напрежения. Това води до поява на обратна последователност, допълнителни загуби, неравномерно натоварване на намотките и влошаване на механичните характеристики. Следователно оценката само по активна мощност не е достатъчна; необходимо е да се анализират също привидната, неактивната, хармоничната и несиметричната компонента на мощността.

Стандартът IEEE-1459-2010 предоставя по-точна основа за анализ на електрически системи, работещи при условия, различни от идеалните синусоидални и симетрични режими. Чрез разделяне на мощностите на фундаментални, хармонични, неактивни и несиметрични компоненти се получава по-пълна представа за енергийния процес в системата.

За настоящото изследване това е особено важно, тъй като трифазният асинхронен двигател работи в монофазна мрежа чрез кондензаторна схема, което води до несиметрично натоварване на намотките и наличие на хармонични съставки. Прилагането на концепциите на IEEE-1459-2010 позволява по-точна оценка на активната, реактивната, привидната и неактивната мощност, както и на влиянието на хармониците и несиметрията върху работата на двигателя. Така се осигурява надеждна

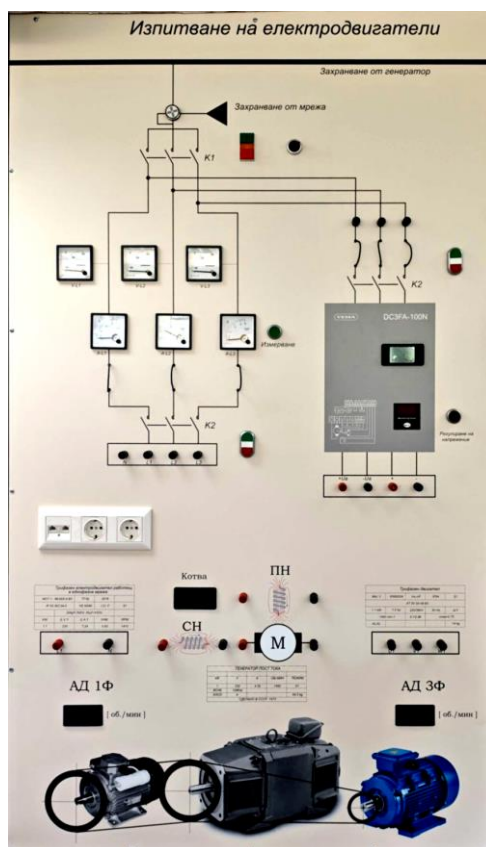
теоретична основа за обработка и анализ на експерименталните резултати, получени с анализатора Metrel MI 2885 Master Q4.

3.1.Описание

Експерименталните изследвания и измервания, представени в настоящата статия, са проведени на специализирана лабораторна установка за изпитване на електрически машини. Установката е разработена и внедрена в Лабораторията 108 Електрообзавеждане и електротранспорт към катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ (ЕСЕО) на Електротехническият факултет при Технически университет – Варна.

Лабораторният стенд е предназначен за изследване на експлоатационните характеристики на еднофазни и трифазни асинхронни двигатели при различни режими на работа – празен ход, двигателен режим и генераторен режим. В настоящото изследване основен обект е трифазен асинхронен двигател с кафезен ротор, работещ в монофазна захранваща мрежа чрез схема с работен и пусков кондензатор.

Установката представлява завършена електромеханична система, която обединява силова електрическа част, система за управление, измервателна апаратура и механична товарна машина. Всички компоненти са монтирани върху обща метална конструкция, осигуряваща необходимата механична устойчивост, надеждност и прецизно съосие между задвижващата и товарната машина. Това позволява провеждането на точни и повторяеми експериментални изследвания при различни режими на натоварване.



Фиг. 3. Общ вид на лабораторния стенд за изпитване на електродвигатели

Таблица 1

Основни технически данни на изследвания двигател

Параметър	Стойност
Тип	ML90S-4
Вид	Трифазен асинхронен двигател с кафезен ротор
Номинална мощност	1,1 kW
Номинално напрежение	230 V
Честота	50 Hz
Номинална скорост	1410 об./мин.
Номинален ток	7,24 A
Коефициент на мощността	$\cos\varphi = 0,93$

Статорните намотки са свързани в триъгълник. Работният кондензатор остава включен през целия установен режим, а пусковият се включва само при развъртането. Така общият капацитет при пуск е 230 μF , след което в схемата остава работният капацитет 30 μF .

Таблица 2

Кондензатори в схемата на двигателя

Елемент	Капацитет	Номинално напрежение	Предназначение
Работен кондензатор	30 μF	450 V	Постоянно включен при работа
Пусков кондензатор	200 μF	300 V	Кратковременно включен при пуск



а)



б)

Фиг. 4. Изследван асинхронен двигател и кондензаторна схема: а) общ вид; б) клемна кутия

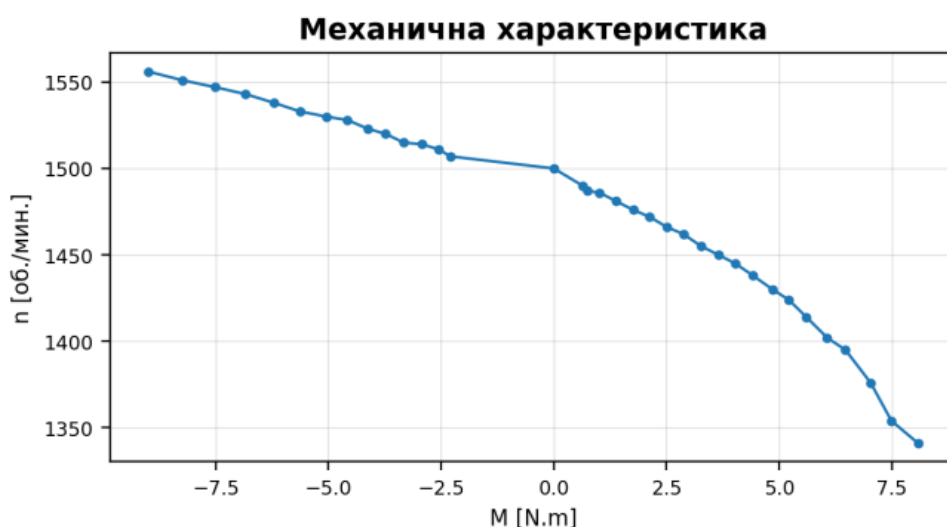
Електрическите величини са регистрирани с анализатор Metrel MI 2885 Master Q4 [6]. Измерени са напрежение, ток, активна, неактивна и привидна мощност, фактор на мощността, фазови диаграми, осцилограми и хармонични съставки. Скоростта е отчетена с цифров тахометър с Hall сензор. След пуска и изключването на пусковия кондензатор натоварването е изменяно плавно от двигателен режим до празен ход и след това над синхронната скорост.

4. Резултати от проведените опити

4.1. Експериментални данни за механичната характеристика

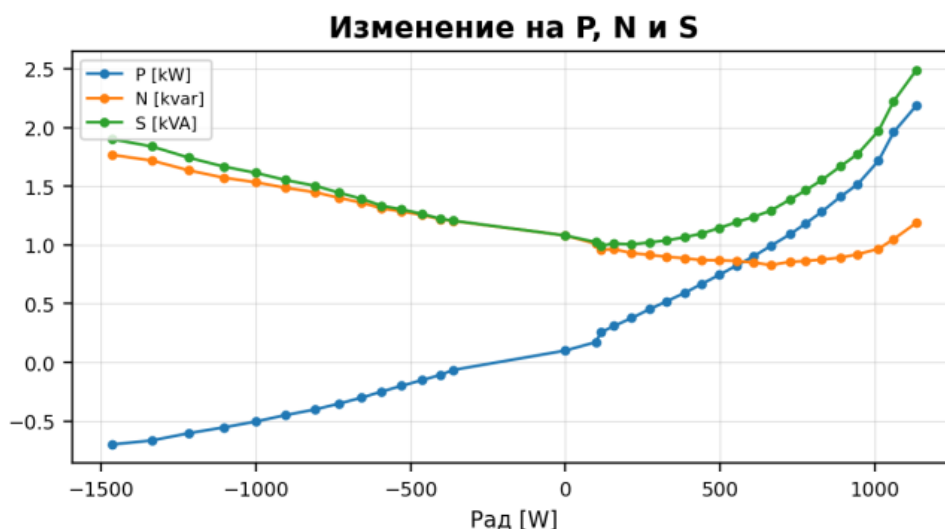
Анализът на експерименталните данни показва, че асинхронният двигател работи нормално и характеристиките му отговарят на теоретично очакваното поведение. При празен ход скоростта е близка до синхронната - около 1500 об./мин., а въртящият момент е нулев.

При увеличаване на натоварването въртящият момент нараства, а честотата на въртене постепенно намалява, което показва увеличение на хлъзгането. При скорости над синхронната се получава отрицателен момент, характерен за генераторен режим.



Фиг. 5. Механична характеристика на асинхронния двигател

4.2. Експериментални данни за мощностите P, N и S

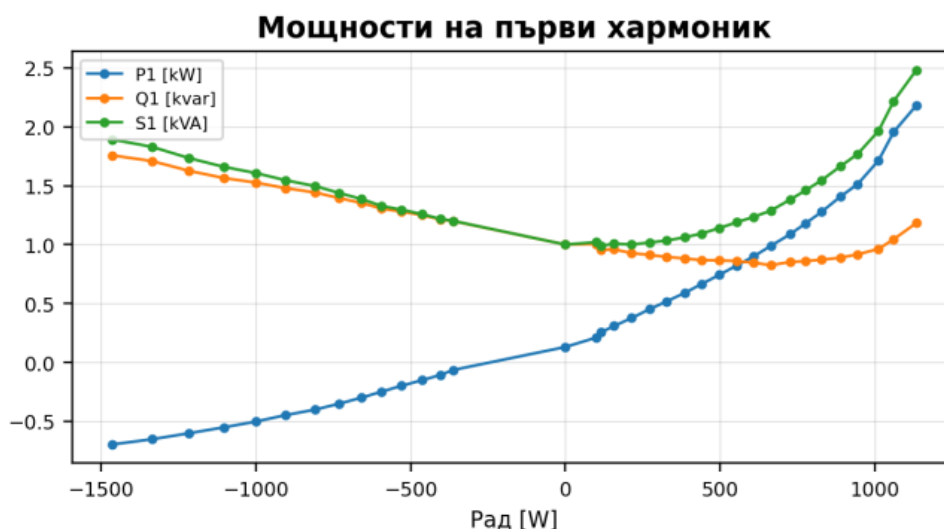


Фиг. 6. Изменение на активната, неактивната и пълната мощност

Анализът на таблицата и графиката показва, че при увеличаване на механичното натоварване активната мощност P нараства почти линейно - от около 0,1 kW при празен ход до около 2,185 kW при най-голям положителен товар.

Неактивната мощност N остава положителна през целия диапазон, защото е свързана със създаването на магнитното поле. Пълната мощност S следва изменението на P и N , като се увеличава при по-високи натоварвания. В генераторен режим P става отрицателна, което означава отдаване на активна мощност към мрежата.

4.3. Експериментални данни за P_1 , Q_1 и S_1



Фиг. 7. Изменение на P_1 , Q_1 и S_1 при различно натоварване

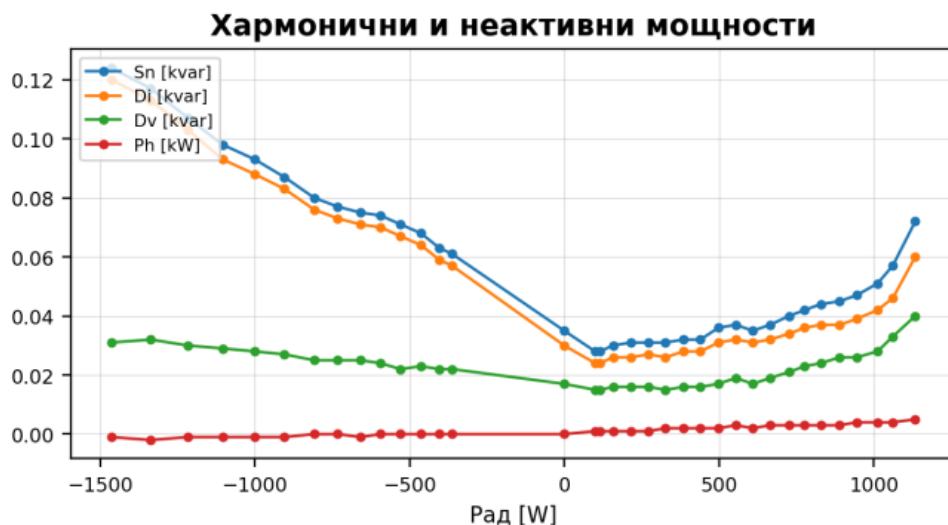
Величините P_1 , Q_1 и S_1 показват мощностите на първия хармоник, чрез който се осъществява основният енергиен обмен между източника и асинхронната машина.

При увеличаване на положителното натоварване активната мощност P_1 нараства почти линейно. В генераторен режим P_1 става отрицателна, което показва отдаване на активна мощност към мрежата. Q_1 остава положителна и е свързана с намагнитването на машината, а S_1 следва изменението на товара.

4.4. Експериментални данни за S_n , D_i , D_v и Ph

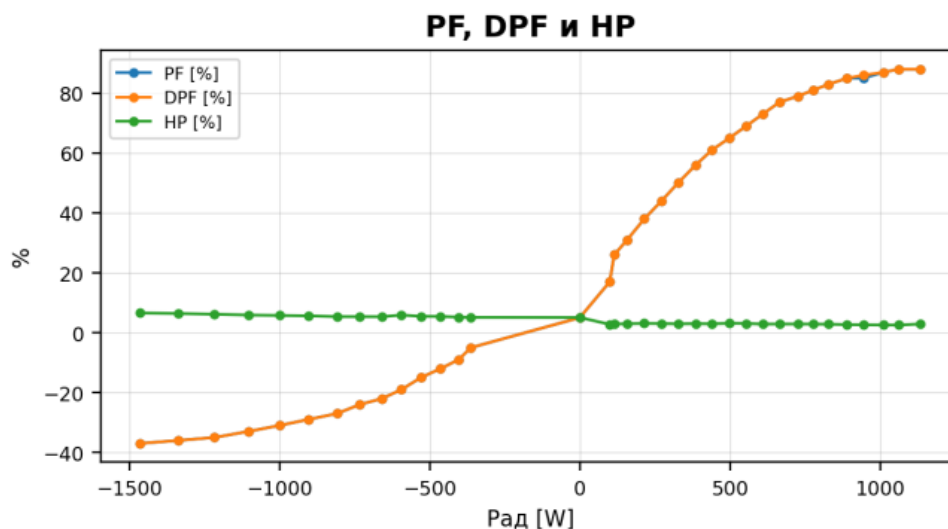
Анализът показва, че хармоничните и неактивните мощности S_n , D_i , D_v и Ph имат малки стойности спрямо основните мощности на машината. Това означава, че основният енергиен обмен се извършва чрез първия хармоник.

Нарастването на тези величини при по-изразен генераторен режим показва изменение на формата на тока и повишаване на хармоничното съдържание.



Фиг. 8. Изменение на S_n , D_i , D_v и P_h

4.5. Експериментални данни за PF, DPF и HP



Фиг. 9. Изменение на PF, DPF и HP при различно натоварване

Данните за PF, DPF и HP показват изменението на фактора на мощността и влиянието на хармоничните съставки при различните режими на работа. При двигателен режим стойностите на PF и DPF са близки, което показва, че изкривяването на тока няма доминиращо влияние върху фактора на мощността.

В генераторен режим се наблюдава изменение на показателите, свързано с промяната на посоката на активната мощност и с увеличаване на скоростта над синхронната.

5. Изводи и резултати

Проведеното изследване показва, че трифазният асинхронен двигател може да работи в монофазна мрежа, когато е приложена подходяща кондензаторна схема. При този начин на захранване двигателят не работи при напълно симетрични условия, както при нормално трифазно захранване, но чрез правилен избор на работен и пусков кондензатор може да се осигури устойчив пуск, стабилна работа и приемливи енергийни показатели.

Основната особеност при монофазното захранване е, че в статора не се създава идеално кръгово въртящо се магнитно поле. Вместо това магнитното поле има пулсиращ или елиптичен характер, което води до понижаване на пусковия момент, увеличаване на приплъзването, повишаване на токовете и по-голямо загряване на намотките. Поради тази причина двигателят не трябва да се натоварва с пълната си номинална трифазна мощност, а е необходимо да се експлоатира с намалено допустимо натоварване.

От направените измервания се установява, че при двигателен режим токът изостава спрямо напрежението, което потвърждава индуктивния характер на асинхронната машина. При увеличаване на механичното натоварване въртящият момент нараства, а скоростта намалява, което е свързано с увеличаване на приплъзването. При превишаване на синхронната скорост машината преминава в генераторен режим, като активната мощност променя знака си и започва отдаване на електрическа енергия към мрежата.

Измерванията на хармоничния състав показват, че общото хармонично изкривяване на напрежението остава ниско във всички изследвани режими. Хармоничното изкривяване на тока е по-изразено, особено при генераторен режим и при по-високи скорости, но стойностите му остават в граници, които не нарушават устойчивата работа на лабораторната установка. Това потвърждава, че използваната схема на свързване и измервателната апаратура позволяват надеждно изследване на работата на двигателя при различни режими.

Използването на анализатора Metrel MI 2885 Master Q4 позволява точно проследяване на основните електрически показатели, включително напрежения, токове, мощности, фазови диаграми, осцилограми и хармоничен състав, което дава възможност за пълна оценка на работата на двигателя.

Използвана литература

1. IEEE Std 1459-2019. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
2. Metrel d.d. MI 2885 Master Q4 Power Quality Analyzer – техническо описание и ръководство за работа.
3. Учебни и справочни материали по електрически машини, асинхронни двигатели и кондензаторни схеми на свързване.

4. Димитров, Л. В., Божинов, Я. Мл., Раев, Х. П., Неделчев, Н. Д., Иванов, В. В., Йорданов, Й. Д., Михайлов, П. Д. Изпитване на електрически машини. Варна, 2004.
5. Маринов, М. Електротехника и електроника. Технически университет - Варна, 2024.
6. Мелузин, Х. Въпроси и отговори по електротехника. Част трета: Електрически машини и трансформатори. София: Техника, 1975.
7. Торопцев, Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. Вып. 611, 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1988.