

В.І. МІШИН, д-р техн. наук, проф., НУБіП України, Київ
В.В. КАПЛУН, д-р техн. наук, доц., НУБіП України, Київ
Р.М. ЧУЄНКО, канд. техн. наук, доц., НУБіП України, Київ
В.В. ГАВРИЛЮК, аспірант, НУБіП України, Київ

ВЛАСТИВОСТІ КОМПЕНСОВАНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН ІЗ СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА

Розглянуто принципові електричні схеми і властивості суміщених робочих і компенсуючих обмоток статора компенсованих асинхронних машин. Подані рекомендації щодо їх практичного використання.

Рассмотрены принципиальные электрические схемы и свойства совмещенных рабочих и компенсирующих обмоток статора компенсированных асинхронных машин. Даны рекомендации по их практическому использованию.

Вступ. Асинхронний двигун (АД) за техніко-економічними показниками, пусковими і робочими характеристиками, асинхронний генератор за зовнішніми характеристиками не задовольняють сучасним вимогам енергозбереження і якості продукції. Причиною цього зокрема є споживання асинхронною машиною (АМ) реактивної потужності. Класичні способи компенсації якої достатньою мірою не дозволяють підвищити енергоефективність АМ. На основі ефекту внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності [3] було запропоновано компенсовану асинхронну машину (КАМ) в якій на основі схемних рішень вдається досягти позитивного впливу на електромеханічні та електромагнітні процеси, і, як результат, підвищення її енергоефективності.

Метою дослідження є визначення властивостей компенсованих асинхронних машин із суміщеними обмотками статора.

Результати досліджень. Відомо, що напруга компенсуючого джерела і споживача по контуру електричного кола зустрічні одна одній. Тому ємнісний струм конденсаторів, випереджаючи свою напругу по фазі в часі на чверть періоду (90^0), при обміні реактивною енергією із споживачем стає по відношенню до нього відстаючим, індуктивним. Таким чином ємнісний струм системи переходить у споживач як струм його збудження. Але магнітне поле у споживачеві – феромагнітному пристрої (ф.у.) створюється сукупною дією всіх його струмів або МРС. При цьому активні складові струмів контурів взаємно врівноважені, а

індуктивні створюють намагнічуючий струм, що збуджує основне магнітне поле.

На схемі рис. 1а елементи W_1 і W_2 представляють обмотки статора (W_1) і ротора (W_2) звичайного АД з короткозамкнутим ротором. При роботі АД на механічне навантаження струми статора I'_1 і ротора i_2 зв'язані між собою умовою рівності МРС як,

$$I'_1 = I'_0 - i_2, \quad (1)$$

де I'_0 – намагнічуючий струм двигуна (див. векторну діаграму рис. 1а).

При приведенні всіх обмоток АД до осі основної обмотки [2], рівних їх числах витків ($W_\Delta = W_1 = W_2$), при перетині єдиним обертовим магнітним потоком ЕРС обмоток однакові $\dot{E}_1 = \dot{E}_\Delta = \dot{E}_2$.

При ввімкненні цих обмоток між собою за схемою поворотного АТ на ємність C_Δ напруга на виході його

$$\dot{U}_{C\Delta} \approx \dot{E}_\Delta + \dot{E}_1 = 2\dot{E}_1 \sin \frac{\delta}{2} \cdot e^{j\frac{\delta}{2}}, \quad (2)$$

і струм

$$i_\Delta = \frac{\dot{U}_{C\Delta}}{-jX_{C\Delta}} \quad (3)$$

із зміною просторового кута δ додаткової обмотки змінюються по фазі в часі на кут $\delta/2$ (рис. 1б, в) відносно їх при $\delta = 0$ за схемою рис. 1а. Загальний намагнічуючий струм (рис. 1а) з умови рівноваги МРС стає рівним $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta + i_2$. Він випереджає взаєміндуктивний (електромагнітний) зв'язок між обмотками за їх ЕРС

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_\Delta = \dot{E}_2 = -jX_m I_0, \quad (4)$$

де X_m – опір взаємної індукції або намагнічуючого контуру;

$X_{C\Delta} = \frac{1}{\omega C_\Delta}$ – ємнісний опір; $\omega = 2\pi f$; f – частота.

Ємнісний струм \dot{I}_Δ за схемою АТ рис. 1а має подвійний вплив на струми АД. Електричним зв'язком між обмотками він разом із струмом \dot{I}_1 основної обмотки статора АД створює його загальний струм $\dot{I} = \dot{I}_1 - \dot{I}_\Delta$, електромагнітно входить до складу намагнічуючого струму $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta + i_2$, заміщує частину індуктивної складової струму основної обмотки $\dot{I}_1 = \dot{I}'_1 - \dot{I}_\Delta$, зменшуючи його величину і збільшую-

чи $\cos\varphi_1$. При цьому загальний струм $i = i_1 - i_\Delta = i_1' - 2i_\Delta$ може мати навіть випереджаючий характер (рис. 1а).

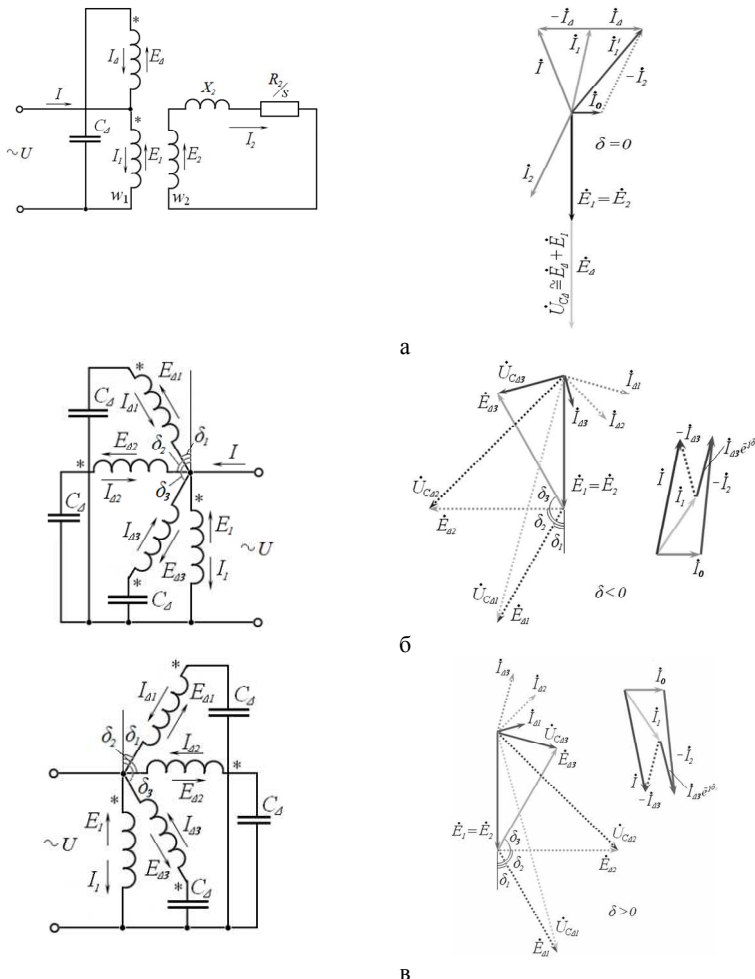


Рис. 1. Принципова електрична схема і фрагмент векторної діаграми фази статора КАМ при з'єднанні обмоток поворотного АТ в загальний вузол різноименними затискачами при $\delta=0$ (а), $\delta<0$ (б), $\delta>0$ (в), $\delta_\kappa = \overline{7} 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$.

Разом з тим підмагнічуюча дія ємнісного струму I_{Δ} дещо збільшує намагнічуючий струм, що збільшує магнітний потік і створені ним ЕРС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ обмоток статора і ротора.

Збільшення ЕРС E_2 короткозамкненого ротора є еквівалентним введенню в коло його (через статор!) деякої додаткової ЕРС $\dot{E}_{\Delta m} = -jX_m \dot{I}_{\Delta}$. З іншого боку збільшення ЕРС \dot{E}_1 основної обмотки статора, врівноваженої напругою \dot{U} мережі, також веде до зниження струмів.

Двигун в деякій мірі стає енергозберігаючим, з підвищеним пусковим моментом. Такий асинхронний двигун з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивній потужності називаємо компенсованим [6].

Проте додаткова обмотка статора (вторинна обмотка АТ за схемою рис. 1,а) є чисто компенсуючою і не несе активного навантаження, але займає певне місце в пазах статора, збільшуючи габарити і масу матеріалу машини. Якщо додаткову обмотку змістити в пазах сердечника статора відносно основної обмотки на деякий кут δ в напрямку обертання поля (рис. 1,б) або проти нього (рис. 1в), то вона перетинатиметься єдиним обертовим магнітним потоком пізніше або раніше основної обмотки на час проходження полем цього кутового шляху δ . ЕРС \dot{E}_{Δ} додаткової обмотки відставатиме в часі дії від ЕРС основної обмотки або випереджати її залежно від напрямку зміщення додаткової обмотки відносно основної. При однакових числах витків $W_{\Delta} = W_1$ обмоток зв'язок між їх ЕРС можна представити як

$$\dot{E}_{\Delta} = \dot{E}_1 e^{j\delta}, \quad (5)$$

де $e^{j\delta}$ – поворотний множник, а знак кута δ приймається за векторними діаграмами рис. 1б, в; при відставанні \dot{E}_{Δ} по фазі в часі від \dot{E}_1 (рис. 1б) $\delta < 0$, при випередженні (рис. 1в) $\delta > 0$.

Таким чином зміна просторової координати додаткової обмотки (вторинної обмотки поворотного АТ) на кут δ приводить до зміни в часі на кут $\delta/2$ її вихідної напруги $\dot{U}_{C\Delta}$ і струму \dot{I}_{Δ} незалежно від характеру електричного опору кола. Відомо, що в схемах пристроїв із співвісними обмотками фаза струму в часі залежить лише від характеру опорів, у схемах 1б, в її можна регулювати зміною не лише характеру навантаження, але й просторової координати хоча б однієї з взаємодуктивних обмоток.

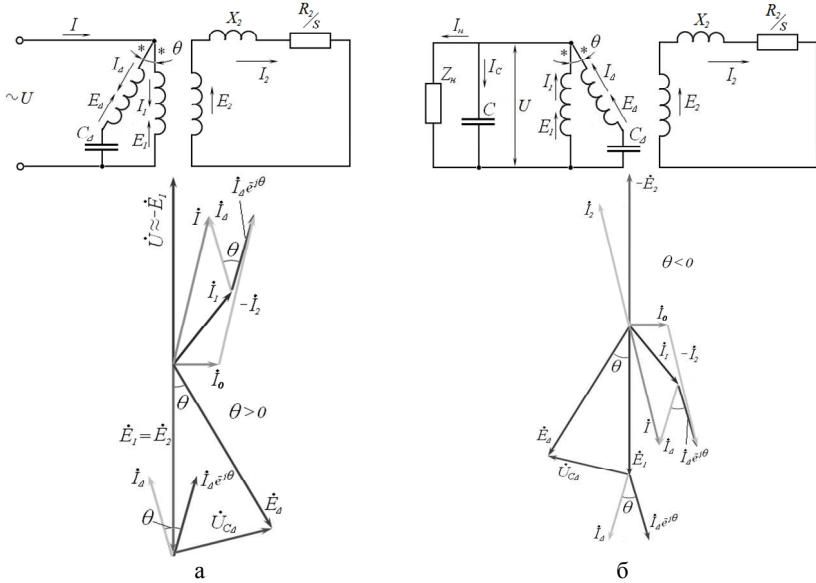


Рис. 2. Принципові електричні схеми і фрагмент векторних діаграм фази статора КАМ при з'єднанні обмоток поворотного АТ в загальний вузол однойменними затискачами $\theta > 0$ (а), $\theta < 0$ (б). $\theta = \mp 30^\circ$.

Так, при $\delta \neq 0$ за рис. 1,б, в ємнісний по суті струм \dot{I}_Δ вторинного кола АТ векторно не перпендикулярний векторам напруг $\dot{U} \approx -\dot{E}_1$ основної обмотки і $\dot{U}_\Delta \approx -\dot{E}_\Delta$ вторинної обмотки, тобто по відношенню до них має як реактивну так і активну складові. На відміну від схеми рис. 1,а (при $\delta=0$) обидві обмотки поворотного АТ можуть нести активне і реактивне навантаження, причому активні складові струмів \dot{I}_1 і \dot{I}_Δ одного напрямку, а реактивні зустрічні, струм \dot{I}_1 основної обмотки є активно-індуктивним, а струм \dot{I}_Δ додаткової (вторинної обмотки АТ) активно-ємнісним.

Кут δ може бути будь-яким в межах $0 \dots 2\pi$, пропорційним пазовому куту. Його величина вибирається залежно від необхідного співвідношення за розподілом величин активних і реактивних потужностей між обмотками і інших сприятливих параметрів, знак $\pm\delta$ приймається за заданим режимом роботи КАМ: $\delta < 0$ в режимі КАД [6] (рис.

1,б); $\delta > 0$ (рис. 1в) для КАГ. На рис. 1,б,в приведені принципи електричних схеми і векторні діаграми відповідних режимів при $\delta = \pm 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ і діаграми струмів з умови рівноваги їх MPC

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \quad (6)$$

при загальному струмі, де $\dot{I}_\Delta e^{-j\theta}$ – струм вторинної обмотки АТ, приведеної до осі основної обмотки.

Такі ж результати за величинами струмів та властивостями дає схема компенсованої асинхронної машини, у якій обмотки статора з'єднані в загальний вузол однойменними затискачами, представляючи поворотний АТ, ввімкнений на електричну ємність C_Δ (рис. 2). У зв'язку із зміною в схемі рис.2 положення по відношенню до основної обмотки затискачів вторинної обмотки АТ змінюється на 180° фаза її ЕРС \dot{E}_Δ і струму \dot{I}_Δ на виході АТ. Загальний струм КАМ представиться як $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$ намагнічуючий струм буде рівний $\dot{I}_0 = \dot{I}_\Delta + \dot{I}_1 e^{-j\theta} + \dot{I}_2$, напруга на виході АТ $\dot{U}_{C\Delta} \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$.

Кут θ між обмотками поворотного АТ теж може бути будь-яким в межах $0 \dots 2\pi$, але при однакових величинах \dot{E}_Δ і \dot{I}_Δ за схемами рис. 1 та 2 кути δ і θ повинні бути зв'язані між собою як $\delta = \pm 180^\circ + \theta$, де для режиму КАД $\delta > 0$ або $\delta = -180^\circ + \theta$, в режимі генератора $\delta < 0$ і $\delta = 180^\circ + \theta$.

При переводі з режиму двигуна (КАД) в генераторний (КАГ) необхідно змінити знаки не тільки ковзання S [4, 3], але й θ [4, 8]; для КАД $S > 0, \theta > 0$, в генератора $S < 0, \theta < 0$.

Висновки. В компенсованих асинхронних машинах слід віддати перевагу для схем рис. 2, які при однакових результатах конструктивно простіші за схеми рис. 1, з'єднання обмоток в загальний вузол однойменними затискачами забезпечує однакові напрями струмів в обмотках, що спрощує розрахунок і аналіз процесів, загальний струм КАМ знаходиться як сума $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$, а не різниця струмів.

Внутрішня ємнісна компенсація в компенсованих асинхронних машинах при функціональному поєднанні обмоток статора як робочих і компенсуючих, ввімкнених за схемою поворотного АТ на електричну ємність, проявляє свою дію в наступних ефектах:

- збільшення пускового струму ротора і його пускового моменту. Так для КАД із зростанням пускового струму ротора на 5 – 10% в порівнянні з базовим АД пусковий момент його зростає на 15 – 20% [3, 7].

– зменшення робочих струмів на 8 – 10%, що призводить до зниження в обмотках на 10 – 15% як активної, так і реактивної потужностей при його $\cos\phi \approx 0,95\dots 0,99$;

– підвищення жорсткості зовнішньої характеристики компенсованого асинхронного генератора (КААГ) зумовлює стабілізацію рівня вихідної напруги і частоти генератора із зростанням навантаження [4, 8].

– подвоєння числа фаз і фазних зон обмотки вдвічі зменшує число пазів на полюс і її фазу [1], зменшує МРС і намагнічуючий струм для створення заданого потоку і ЕРС. При $\alpha - \theta = 0$ хвилі МРС співпадають по першій (основній) гармоніці, але вищі просторові гармоніки $\nu = 2mk \pm 1$ зміщені в них на кут $\gamma = \alpha - \nu\theta$. Найбільш шкідливі в трифазній машині гармоніки зворотна $\nu = -5$ і пряма $\nu = 7$ взаємно компенсуються і не мають місця в загальній хвилі МРС.

Список літератури: 1. *Копылов И.П.* Электрические машины. М.: Высшая школа, 2006. – 607 с. 2. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. – 327 с. 3. *Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Гаврилюк В.В.* Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе // Электротехника. – 2009. – №8. – С. 30-36. 4. *Мишин В.И., Каплун В.В., Макаревич С.С.* Автономные асинхронные генераторы повышенной эффективности // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – № 2-4. – С. 41-51. 5. Патент України № 51814 7 Н02К Бюл, №6. 2002 Асинхронний електродвигун (Мишин В.І., Чуенко Р.М. та ін.). 6. Патент України № 56330 7 Н02К Бюл, №15. 2003 Трифазний асинхронний електродвигун (Мишин В.І., Чуенко Р.М. та ін.). 7. Патент України № 84049 А Н02К Бюл, №7. 2004 Асинхронний електродвигун (Мишин В.І., Кафтан Б.М. та ін.). 8. Патент України № 83730 7 С2 Н02К Бюл, №15. 2008 Автономний асинхронний генератор (Мишин В.І., Каплун В.В. та ін.).

*Поступила в редколлегию 02.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*