

УДК 621.3.016.45

В. М. Ковальов, канд. техн. наук,
В. М. Фатєєв, канд. техн. наук
 Харківська національна академія
 міського господарства

ГЕНЕРАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОДВІЙНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Вступ. З метою компенсації реактивної потужності можливе використання асинхронних двигунів з фазним ротором при їх неповному навантаженні механічною потужністю, які можуть працювати в режимі подвійного живлення, коли електроенергія від мережі підводиться як до статорних, так і до роторних обмоток. При цьому на статорні обмотки подається синусоїдна напруга, а на роторні обмотки – регульована напруга постійного струму [1].

При певному значенні постійного струму збудження в обмотці ротора асинхронний двигун починає працювати з коефіцієнтом потужності $\cos\varphi = 1$, тобто не споживає з мережі реактивної потужності, а при подальшому його збільшенні працює з випереджаючим $\cos\varphi$, тобто генерує в мережу реактивну потужність. Важливо зазначити, що струми статора і ротора при цьому не повинні перевищувати номінальних значень.

Застосування асинхронного двигуна для генерації реактивної потужності має переваги над конденсаторними батареями, тому що дозволяє її плавне регулювання. Але втрати потужності на генерацію реактивної енергії для двигуна більші, ніж для конденсаторних батарей. Тому такий режим двигуна доцільно застосувати у механізмах з тривалим режимом роботи, нечастими пусками і потужністю більше 200 кВт.

Мета досліджень. Метою досліджень є розробка принципової схеми керування асинхронним двигуном з подвійним живленням та визначення на основі теоретичного аналізу складових повної потужності двигуна при відповідних режимах роботи.

Матеріал і результати досліджень. Поставлена мета вирішується в два етапи. На першому етапі розроблена силова схема та схема керування асинхронним двигуном з подвійним живленням зображені на рис.1 і рис.2. Силова схема містить в собі автоматичні вимикачі QF1, QF2 вимірювальні прилади: фазометр РФ1 і амперметр РА1 ввімкнуті у вторинну обмотку трансформатора струму ТА1, асинхронний двигун М1, в коло ротора якого ввімкнуті додаткові активні опори R1, R2 і котушка реле ковзання КТЗ, керований випрямляч UZ1 до виходу якого ввімкнуті амперметр РА2, котушка реле струму КА1 і згладжуючий дросель L1. Пуск двигуна відбувається схемою керування після вмикання вимикачів QF1, QF2 та рубильника Q натисканням на кнопку SB1 "Пуск". Після чого спрацьовує магнітний пускач КМ1 і своїми силовими контактами КМ1.1 з'єднує статор двигуна з мережею. Його блок-контакт

магнітного пускача КМ4, силові контакти КМ4.1 якого вимикають опори R1, R2 з кола обмотки ротора, а блок-контакти КМ4.2 замикають коло живлення котушки магнітного пускача КМ2. Після спрацювання КМ2 його силові контакти КМ2.2 і КМ2.3 з'єднують обмотки ротора з виходом тиристорного випрямляча VZ1, в колі ротора з'являється постійний струм і асинхронний двигун переходить в режим синхронного. Спрацьовує реле струму КА1 і своїм контактом КА1.1 шунтує контакти кнопки SB1. Далі з витримкою часу спрацьовує реле часу КТ1, розмикаючи свої контакти КТ1.1 в колі котушки реле напруги KV1, і його контакт KV1.1 розмикається. Якщо за час витримки реле КТ1 двигун не ввійде в режим синхронного, то він вимикається від напруги. Це так званий захист двигуна від зatoryного пуску.

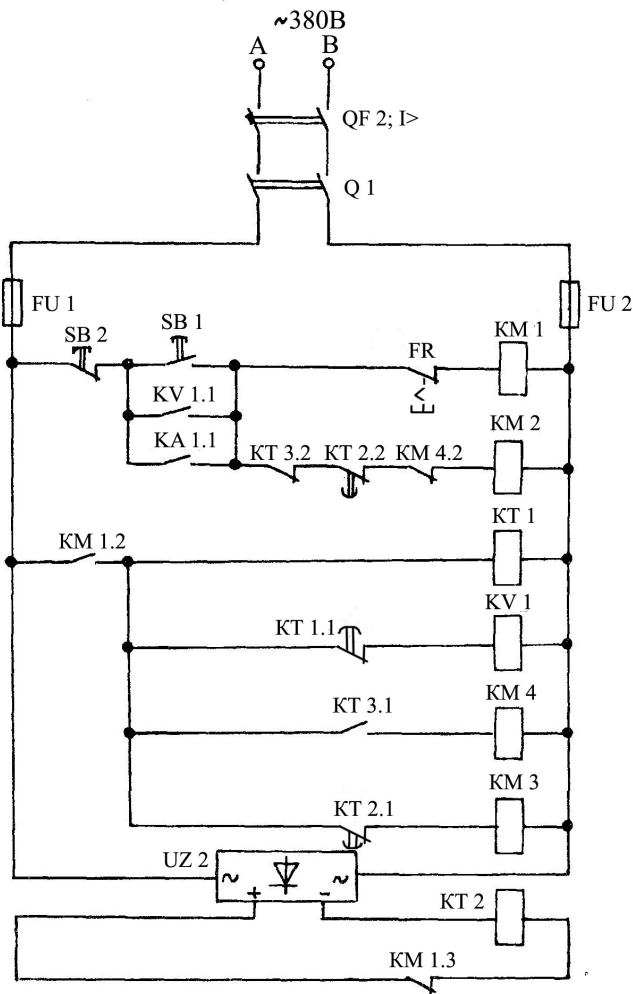


Рис.2 - Схема керування двигуном

Асинхронний двигун при подвійному живленні перетворюється в синхронізований асинхронний двигун, який має властивість одночасно перетворювати електроенергію в механічну енергію на валу і в реактивну електроенергію в обмотках статора згідно рівнянь Ампера-Фарадея (1). Ротор асинхронного двигуна при подвійному живленні перетворюється в електромагніт постійного струму (обмотка збудження по аналогії з синхронним двигуном), який обертається синхронно з обертальним магнітним полем нерухомих обмоток статора.

Магнітна і геометрична вісь ротора завжди відстає від обертальної магнітної осі полюса на так званий кут навантаження. З ростом навантаження на валу ротора цей кут зростає і при 90° магнітні силові лінії статора і ротора гублять взаємозв'язок, тобто

Для отримання рівнянь балансу потужностей асинхронного двигуна в режимі подвійного живлення необхідно розглянути процес електромеханічного перетворення електроенергії в двигуні, при якому відбувається одночасне перетворення електроенергії у механічну енергію на валу ротора згідно з законом Ампера і в електрорушійну силу статора згідно з законом Фарадея. Таким чином, енергія безперервно перетворюється із однієї форми в іншу. Цей процес можна представити системою рівнянь Ампера-Фарадея, тобто

$$\left. \begin{aligned} F = BI \rightarrow M = FR \rightarrow P = M\omega \\ E = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{ldB}{dt} = Bl \frac{dS}{dt} = BIV \end{aligned} \right\} (1)$$

де F, M – сила і крутний момент на валу ротора; V, ω – лінійна і кутова швидкість ротора; l, R, S – довжина, радіус і переріз ротора.

“розщеплюються”. Ротор під дією навантаження зупиниться. Такий режим називають випадання ротора із синхронізму.

Розглянемо яким же чином синхронізований асинхронний двигун генерує у мережу реактивну електроенергію. Будемо пам'ятати, що ротор і його магнітне поле рухаються відносно нерухомих обмоток статора, індуючи у них ЕРС згідно з законом Фарадея. Розглянемо момент часу, коли південний полюс ротора взаємодіє з північним полюсом статора (рис. 3).

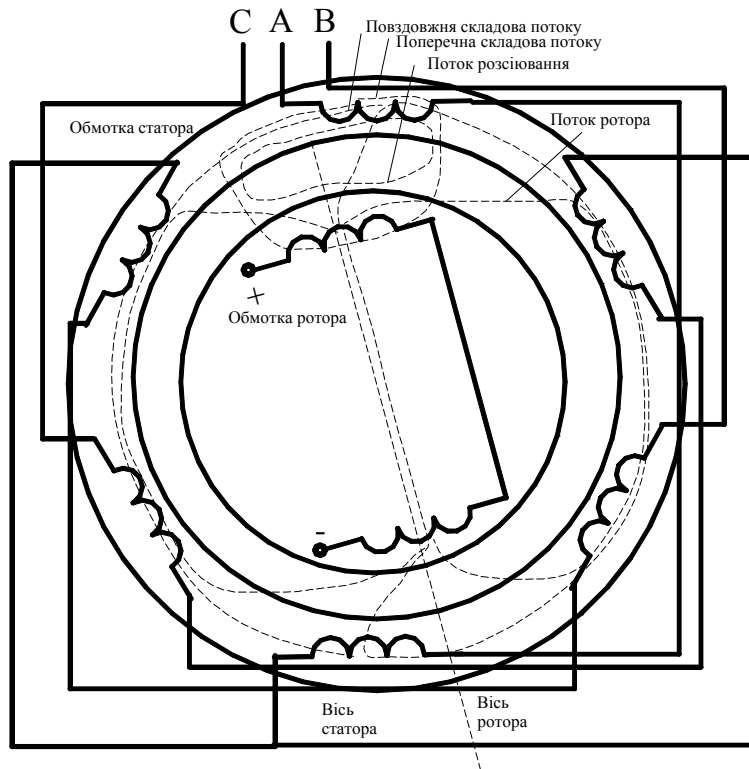


Рис. 3 - Принцип генерації реактивної потужності асинхронним двигуном

Тут видно, що основна частка силових ліній потоку ротора перетинає обмотку фази А індуючи у ній так звану ЕРС обертання $E_o = C\phi_r\omega_r$, напрямлену згідно з правилом Ленца проти причини, що її створила, тобто проти ЕРС фази U_a мережі. Причому ЕРС обертання менше за модулем від ЕРС мережі, тобто, $E_o < U_a$ на величину активних та індуктивних спадів напруги на обмотці фази А. З рис. 3 також видно, що частка потоку ротора (назвемо її реактивною) ϕ_p перетинає обмотки сусідніх фаз, індуючи у них ЕРС (назвемо її реактивною) $E_p = C_p\phi_p\omega_r$. Очевидно реактивна ЕРС випереджає, тобто з'являється раніше відповідних ЕРС мережних фаз В і С на кут 60°

електричних градусів, як це показано на векторній діаграмі (рис. 4).

Величина реактивної ЕРС залежить від величини магнітного потоку i , отже, від струму обмотки збудження.

Таким чином, змінюючи струм збудження можна створювати режим роботи асинхронного двигуна з подвійним живленням, з відстаючим $\cos \varphi$, $\cos \varphi = 1$ і випереджаючим $\cos \varphi$. При цьому двигун в залежності від струму збудження споживає реактивну потужність, не споживає її і генерує реактивну потужність.

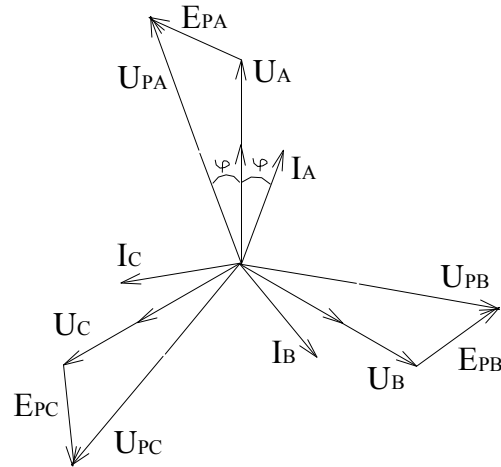


Рис. 4 - Векторні діаграми напруг і струмів

Очевидно, що кожному з режимів відповідають і свої рівняння балансу потужності.

Розглянемо режим споживання реактивної потужності і складемо рівняння електричної рівноваги для фази А. Магнітний потік, створений обмоткою фази А для зручності аналізу умовно розкладемо на три складових: повздовжня, поперечна і розсіювання, тобто $\phi_d, \phi_q, \phi_\sigma$ як показано на рис.3. Складові потоків $\phi_d, \phi_q, \phi_\sigma$ створюються умовними складовими струму I_d, I_q, I_σ та самі при цьому індукують відповідні ЕРС самоіндукції в обмотці статора, тобто

$$\dot{E}_d = \omega_A W_A \dot{\phi}_d = \omega L_d \dot{I}_d = X_d \dot{I}_d; \quad \dot{E}_q = \omega L_q \dot{I}_q = X_q \dot{I}_q; \quad E_\sigma = X_\sigma \dot{I}, \quad (2)$$

де W_A, L, X – кількість витків обмотки, відповідні індуктивності та індуктивні опори. Тоді рівняння електричної рівноваги фази А з урахуванням ЕРС обертання

$$\dot{U}_A = \dot{I}_{Aa} R_A + \dot{E}_d + \dot{E}_q + \dot{E}_\sigma + E_o = \dot{I}_{Aa} R + X_d \dot{I}_d + X_\sigma \dot{I}_\sigma + C\Phi_r \omega_r \quad (3)$$

Помножимо (3) на повний струм статора та його складові і одержимо рівняння балансу потужності з урахуванням, що крутний момент дорівнює $M = C\Phi_r I_A$

$$\dot{U}_A \dot{I}_A = \dot{I}_A^2 R_A + \dot{X}_d \dot{I}_d^2 + \dot{X}_q \dot{I}_q^2 + \dot{X}_\sigma \dot{I}_\sigma^2 + M\omega_r \quad (4)$$

У рівняння (4) добуток $\dot{U}_A \dot{I}_A$ є повна потужність, що споживається фазною обмоткою; $\dot{I}_A^2 R$ і $M\omega_r$ – активна потужність, тобто тепла і механічна потужність; $X_d \dot{I}_d^2, X_q \dot{I}_q^2, X_\sigma \dot{I}_\sigma^2$ – складові реактивної потужності.

При збільшенні струму збудження настає момент, коли індукована магнітним потоком ротора реактивна ЕРС дорівнює сумі складових ЕРС самоіндукції, тобто статор асинхронного двигуна з подвійним живленням не споживає із мережі реактивної потужності і коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 1$. При цьому рівняння електричної рівноваги фазної обмотки і балансу потужності матимуть вигляд

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{I}_A R_A + E_0 = \dot{I}_A R_A + C\Phi\omega_r \\ \dot{U}_A \dot{I}_A &= \dot{I}_A^2 R_A + M\omega_r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Звернемо увагу, що рівняння (5) аналогічні для рівнянь двигуна постійного струму [1].

При подальшому збільшенні струму збудження реактивна ЕРС E_p зростає і створює реактивний струм, що випереджає за фазою напругу, тобто асинхронний двигун з подвійним живленням генерує у мережу реактивну енергію. Рівняння електричної рівноваги і балансу потужності при генерації реактивної потужності

$$\left. \begin{aligned} U_A &= \dot{I}_A R_A + C\Phi\omega_r + \dot{E}_p \\ \dot{U}_A \dot{I}_A &= \dot{I}_A^2 R_A + M\omega_r + \dot{E}_p \dot{I}_A \\ \dot{S} &= \dot{P} + \dot{Q} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Залежність споживання і генерації реактивної потужності виражаються так званим U – подібним характеристиками як залежність струму статора від струму ротора $I_s = f(I_r)$, що було підтверджено експериментальними дослідженнями.

Висновки. Розроблена схема керування асинхронним двигуном з подвійним живленням. На основі теоретичного аналізу отримані рівняння балансу потужностей асинхронного двигуна з подвійним живленням в залежності від струму живлення обмотки ротора. З рівнянь балансу потужностей впливає три режими роботи асинхронного двигуна з подвійним живленням: 1) режим споживання реактивної потужності з відстаючим $\cos \varphi$; 2) режим неспоживання реактивної потужності з $\cos \varphi = 1$; 3) режим генерації реактивної потужності з випереджаючим $\cos \varphi$.

Список літератури

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.-Л. Энергия, 1966. 782 с.

ГЕНЕРАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ МОЩНОСТІ АСИНХРОННИМ ДВИГАТЕЛЕМ С ДВОЙНИМ ПИТАННЯМ

В.М. Ковалев, В.М. Фатеев

Рассмотренные вопросы генерации реактивной мощности асинхронным двигателем с фазным ротором при питании стороны статора трехфазным переменным током, а ротора – постоянным током. Разработанная схема управления асинхронным двигателем. На основе теоретического анализа полученные уравнения баланса мощностей двигателя в зависимости от величины тока питания ротора.

GENERATION OF REACTIVE POWER ASYNCHRONOUS ENGINE WITH DOUBLE FEED

V.M. Kovalev, V.M. Fateev

Considered questions of generation of reactive power an asynchronous engine with a phase rotor at the feed of side of stator by a three-phase alternating current, and rotor – by a direct current. Developed chart of asynchronous engine management. On the basis of theoretical analysis the got equalizations of balance of engine powers are depending on the size of current of feed of rotor.