

УДК 629.5.054:621.311

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ПУСКАХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Н. И. Муха, С. С. Павленко, С. А. Дудко

Одесская национальная морская академия

ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, 65029, Украина. E-mail: mykola_mukha@hotmail.com

Рассмотрены процессы динамической компенсации реактивной энергии при пуске асинхронных двигателей от судовой электростанции соизмеримой мощности. Приведены результаты моделирования процесса прямого пуска электродвигателя без компенсации и с компенсацией реактивного тока двигателя в условиях соизмеримости мощности генератора, изменяющейся нагрузки и компенсирующего устройства. Сделан анализ изменения активного и реактивного сопротивления асинхронного двигателя во время прямого пуска без компенсации и с компенсацией реактивной мощности.

Ключевые слова: пусковые режимы асинхронных электродвигателей, реактивная мощность, коэффициент мощности, система компенсации.

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ В СУДОВІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ ПРИ ПУСКАХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

М. Й. Муха, С. С. Павленко, С. А. Дудко

Одеська національна морська академія

вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна. E-mail: mykola_mukha@hotmail.com

Розглянуто процеси динамічної компенсації реактивної енергії при пуску асинхронних двигунів від судової електростанції сумірної потужності. Приведено результати моделювання процесу прямого пуску електродвигуна без компенсації і з компенсацією реактивного струму двигуна в умовах сумірності потужності генератора, навантаження, що змінюється, і компенсуючого пристрою. Зроблено аналіз зміни активного й реактивного опору асинхронного двигуна під час прямого пуску без компенсації та з компенсацією реактивної потужності.

Ключові слова: пускові режими асинхронних електродвигунів, реактивна потужність, коефіцієнт потужності, система компенсації.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. До настоящего времени на судах нашли применение только конденсаторные компенсаторы, реагирующие на средние значения реактивного тока нагрузки. В таких устройствах переключение секций конденсаторов происходит один раз за несколько секунд. Учитывая быстродействие судовых электрических сетей, такие компенсаторы не способны реагировать на переходные процессы, вызванные переключениями судовой нагрузки.

Рассмотрим режим прямого пуска асинхронного двигателя от сети соизмеримой мощности, в качестве которой рассматривается судовая электростанция. Как известно, в режиме пуска асинхронный двигатель потребляет большой реактивный ток, значительно снижая общий коэффициент мощности генерирующей сети.

Компенсация реактивной мощности двигателя во время пуска позволяет уменьшить общий потребляемый ток из сети.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для компенсации потребляемого реактивного тока рассмотрим применение регулируемого источника емкостного тока коммутируемых конденсаторов (рис. 1).

Исследование переходных процессов выполним на математической модели, содержащей описания синхронного генератора с дизельным приводом, асинхронного двигателя и конденсаторного регулируемого источника реактивного тока [2].

Моделируемая установка содержит системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора, частоты вращения приводного дизеля и устройство компенсации реактивной мощности нагрузки.

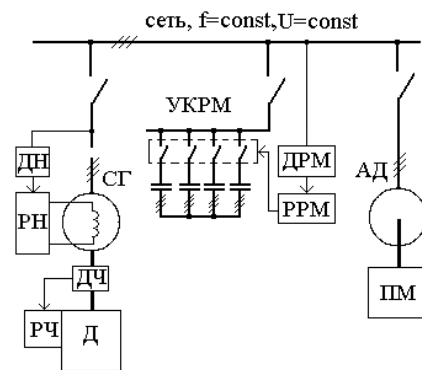


Рисунок 1 – Функциональная схема судовой электростанции с устройством компенсации реактивной мощности (УКРМ): СГ – синхронный генератор; Д – дизельный двигатель; АД – асинхронный двигатель; ПМ – приводимый механизм; ДН, ДЧ, ДРМ – датчики напряжения, частоты, реактивной мощности; РН, РЧ, РРМ – регуляторы напряжения, частоты вращения, реактивной мощности

Проведем моделирование процесса прямого пуска электродвигателя без компенсации (рис. 2) и с компенсацией реактивного тока двигателя (рис. 3).

Мощность пускаемого двигателя на рис. 2, 3 составляет 20 % от мощности дизель-генератора. Начальная нагрузка генератора до пуска двигателя составляла 12,5 % при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 1,0$.

В качестве базовых значений электромагнитного пускового момента M_d и тока I_g на рис. 2, 3 приняты номинальные значения соответствующих параметров генератора, а также номинальная частота вращения пускаемого электродвигателя ω_d . На рис. 2, 3 приведены изменения угла между напряжением и током нагрузки φ в радианах и коэффициента мощности сети $\cos\varphi$.

Регулирование емкостного тока в модели (рис. 3) осуществляется регулятором емкостного тока, который обеспечивает близкий к нулю угол φ и практически единичный коэффициент нагрузки $\cos\varphi$.

Сравнение переходных процессов на рис. 2, 3 показывает, что при компенсации реактивной энергии максимальный пусковой ток I_g уменьшается в два раза, пусковой момент уменьшается с трех до двух о.е., а время разгона электродвигателя сокращается с 1,9 с до 1,7 с.

Далее выполним анализ изменения активного и реактивного сопротивления асинхронного двигателя во время прямого пуска без компенсации и с компенсацией реактивной мощности. Сделаем допущение о постоянстве напряжения и частоты судовой сети.

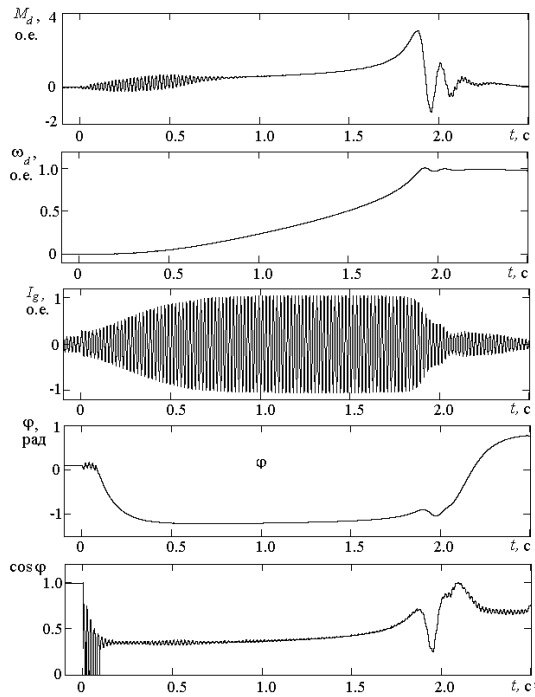


Рисунок 2 – Моделирование процесса пуска асинхронного двигателя мощностью 20 % от мощности судовой электростанции

С целью проведения расчетов пусковых токов

асинхронного двигателя воспользуемся известной схемой замещения двигателя с приведенным к статорной цепи контуром намагничивания (рис. 4,а).

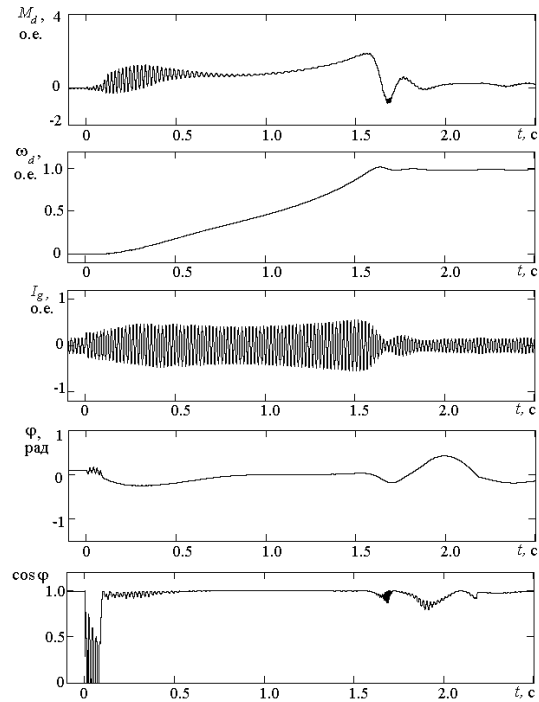


Рисунок 3 – Пуск асинхронного двигателя мощностью 20 % от мощности судовой электростанции с емкостной компенсацией реактивной энергии

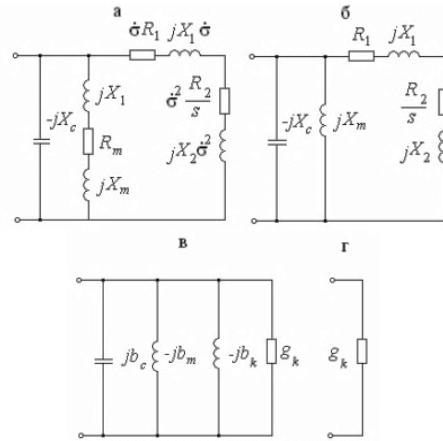


Рисунок 4 – Схемы замещения асинхронного двигателя с емкостной компенсацией реактивной мощности:

- а) схема замещения с вынесенным контуром намагничивания;
- б) упрощенная схема замещения;
- в) схема проводимостей;
- г) скомпенсированная активная проводимость

Вынесение контура намагничивания электродвигателя на рис. 4 осуществляется путем введения комплексного поправочного коэффициента σ [1].

$$\sigma = 1 + \frac{R_1 + jX_1}{R_m + jX_m} \quad (1)$$

где R_1, X_1 – активное и индуктивное сопротивление рассеивания статорной цепи; R_m, X_m – активное и индуктивное сопротивление контура намагничивания; R_2, X_2 – активное и индуктивное сопротивление рассеивания цепи ротора; X_c – емкостное сопротивление конденсаторов УКРМ; s – скольжение асинхронного двигателя.

Учитывая, что активное сопротивление контура намагничивания асинхронного двигателя на порядок меньше индуктивного $R_m \ll X_m$, поправочный коэффициент (1) приблизительно равен $\sigma \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} - j \frac{R_1}{X_m}$, а его квадрат можно считать по приближенному выражению:

$$\sigma^2 = \left(1 + \frac{R_1 + jX_1}{R_m + jX_m}\right)^2 \approx \left(1 + \frac{X_1}{X_m} - j \frac{R_1}{X_m}\right)^2 \approx 1 + 2 \frac{X_1}{X_m} - 2j \frac{R_1}{X_m}.$$

Правая ветвь схемы замещения (рис. 4,а) представляет контур рассеивания или короткозамкнутый контур, сопротивление которого Z_k в процессе пуска значительно меньше сопротивления контура намагничивания Z_m и определяет величину пускового тока двигателя.

Полное сопротивление короткозамкнутого контура равно:

$$Z_k = \sigma R_1 + \sigma jX_1 + \sigma^2 \frac{R_2}{s} + \sigma jX_2$$

и может быть рассчитано по приближенной формуле:

$$Z_k \approx \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)R_1 - j \frac{R_1^2}{X_m} + j \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)X_1 + \frac{R_1}{X_m} X_1 + \left(1 + 2 \frac{X_1}{X_m}\right) \frac{R_2}{s} - 2j \frac{R_1 R_2}{s X_m} + j \left(1 + 2 \frac{X_1}{X_m}\right)X_2 + 2 \frac{R_1 X_2}{X_m} = R_k + jX_k,$$

где R_k, X_k – активная и реактивная составляющие сопротивления Z_k , которые соответственно равны:

$$R_k = \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)R_1 + \frac{R_1}{X_m} X_1 + \left(1 + 2 \frac{X_1}{X_m}\right) \frac{R_2}{s} + 2 \frac{R_1 X_2}{X_m}; \quad (2)$$

$$X_k = -\frac{R_1^2}{X_m} + \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)X_1 - 2 \frac{R_1 R_2}{s X_m} + \left(1 + 2 \frac{X_1}{X_m}\right)X_2. \quad (3)$$

Если через сопротивления Z_m и Z_k определить проводимости основного контура y_m и контура рассеивания y_k , то можно получить схему замещения

асинхронного двигателя из параллельно соединенных проводимостей (рис. 4,в):

$$y_m = \frac{1}{Z_m} \approx -jb_m = -j \frac{1}{X_m}, \quad (4)$$

здесь $X_m \gg X_1$ и $X_m \gg R_m$.

$$y_k = \frac{1}{Z_k} = \frac{1}{R_k + jX_k} = \frac{R_k - jX_k}{R_k^2 + X_k^2} = g_k - jb_k, \quad (5)$$

где g_k, b_k – активная и реактивная проводимость контура рассеивания, равные:

$$g_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_k^2}; \quad b_k = \frac{X_k}{R_k^2 + X_k^2}. \quad (6)$$

Сопротивление конденсаторов УКРМ X_c образует емкостную проводимость:

$$y_c = j \frac{1}{X_c}. \quad (7)$$

Таким образом, полная проводимость асинхронного двигателя y_d с компенсирующими конденсаторами определяется параллельным соединением реактивных проводимостей конденсаторов b_c , основного контура намагничивания b_m и контура рассеивания b_k , а также активной проводимости контура рассеивания g_k . Следует отметить, что небольшой величиной активной проводимости контура намагничивания g_m мы пренебрегаем.

$$y_d \approx jb_c - jb_m - jb_k + g_k. \quad (8)$$

Модуль полной проводимости асинхронного двигателя с емкостной компенсацией равен:

$$|y_d| = \sqrt{g_k^2 + (b_c - b_m - b_k)^2}. \quad (9)$$

Если выполняется точная компенсация реактивной мощности, т.е. $b_c = b_m + b_k$, то проводимость двигателя будет равна активной проводимости его контура рассеивания (рис. 4,г):

$$y_{dc} = g_k.$$

На рис. 5 построены зависимости проводимостей электродвигателя от скольжения, построенные по выражениям (2)–(9).

Проводимость АД без компенсации реактивной мощности будет определяться кривой $|y_d|$ на рис. 5, при полной компенсации проводимость равна g_k . Максимум функции $|y_d|$ достигается при единичном скольжении, $s=1$, а максимум g_k наступает при некотором критическом скольжении в конце разгона (рис. 3). Величина максимума g_k в два раза меньше максимума полной проводимости y_d , что и определяет вдвое меньший пусковой ток компенсированного двигателя.

Следует заметить, что если в формулах (2) и (3)

пренебречь величинами $\frac{X_1}{X_m}$ и $\frac{X_2}{X_m}$ по сравнению с единицей, то эти выражения значительно упро-

стятся, что соответствует упрощенной схеме замещения АД (рис. 4,б):

$$R_k \approx R_1 + \frac{R_2}{s} \quad \text{и} \quad X_k \approx X_1 + X_2. \quad (10)$$

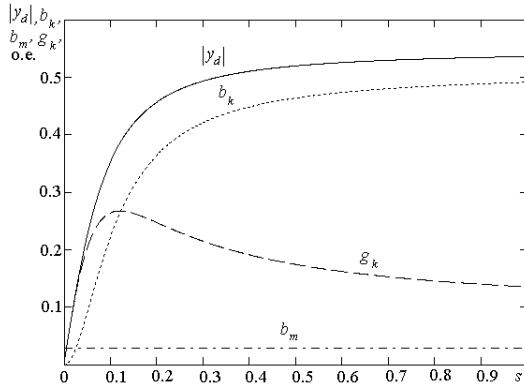


Рисунок 5 – Зависимости проводимостей схемы замещения асинхронного двигателя от скольжения

Тогда проводимости схемы замещения (рис. 4,в) могут быть определены:

$$g_k \approx \frac{R_1 + \frac{R_2}{s}}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2};$$

$$b_k \approx \frac{X_1 + X_2}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2}; \quad (11)$$

$$y_k \approx \frac{1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2}}.$$

Максимальное значение проводимости, которая определяет максимальную величину пускового тока двигателя, примерно равно:

$$y_{max} \approx \frac{1}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}}. \quad (12)$$

На рис. 6 построены приближенные зависимости проводимостей электродвигателя от скольжения, построенные по формулам (11). Погрешности такого упрощения составляют примерно 4 % по сравнению с расчетами по выражениям (2) и (3).

Максимум активной проводимости асинхронного двигателя $g_k(s)$ во время пуска наступает при скольжении, близком к номинальному (рис. 5, 6), т.е. в конце разгона. Определим величину этого максимума и значение критического скольжения.

Для этого приравняем к нулю производную активной проводимости по скольжению:

$$\frac{dg_k(s)}{ds} = 0. \quad (13)$$

Функцию $g_k(s)$ определим по приближенным выражениям (11).

$$g_k(s) = \frac{R_1 + \frac{R_2}{s}}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2} =$$

$$= \frac{R_1 s^2 + R_2 s}{(R_1 s + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2 s^2} = \frac{v(s)}{u(s)}.$$

Тогда условие экстремума принимает вид:

$$u \frac{dv}{ds} - v \frac{du}{ds} = 0.$$

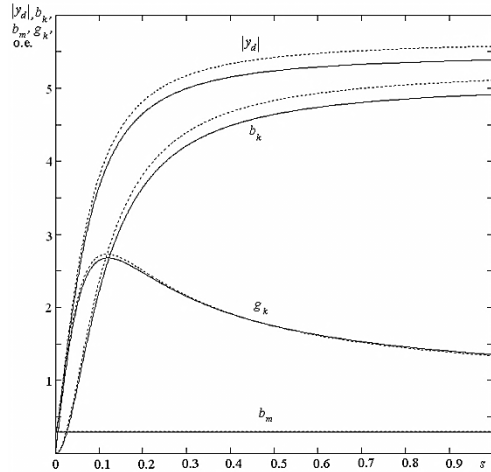


Рисунок 6 – Приближенные зависимости (пунктир) проводимостей схемы замещения асинхронного двигателя от скольжения

Составим полином относительно скольжения:

$$(R_1^2 s^2 + 2R_1 R_2 s + R_2^2 + (X_1 + X_2)^2 s^2) \times$$

$$\times (2R_1 s + R_2) - (2R_1^2 s + 2R_1 R_2 +$$

$$+ 2(X_1 + X_2)^2 s)(R_1 s^2 + R_2 s) = 0$$

или

$$(R_1^2 - (X_1 + X_2)^2) s^2 + 2R_1 R_2 s + R_2^2 = 0;$$

$$s^2 + \frac{2R_1 R_2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2} s +$$

$$+ \frac{R_2^2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2} = 0,$$

корни которого равны:

$$s_{1,2} = -\frac{R_1 R_2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2} \pm$$

$$\pm \sqrt{\frac{R_1^2 R_2^2}{(R_1^2 - (X_1 + X_2)^2)^2} - \frac{R_2^2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2}} =$$

$$= \frac{R_2 (R_1 \pm (X_1 + X_2))}{(X_1 + X_2)^2 - R_1^2};$$

$$s_1 = \frac{R_2}{X_1 + X_2 - R_1};$$

$$s_2 = -\frac{R_2}{X_1 + X_2 + R_1};$$

откуда получаем, что критическое значение скольжения, обеспечивающее максимум функции $g_k(s)$, примерно равно

$$s_{kp} = \frac{R_2}{X_1 + X_2 - R_1}. \quad (14)$$

Во время пуска активная проводимость двигателя имеет максимум, равный величине

$$g_{kmax}(s_{kp}) = \frac{1}{2(X_1 + X_2)}. \quad (15)$$

Значение максимума полной проводимости электродвигателя примерно равно

$$y_{kmax} \approx \frac{1}{X_1 + X_2}. \quad (16)$$

Сравнение выражений (15) и (16) показывает, что максимум активной проводимости вдвое мень-

ше, чем наибольшее значение полной проводимости:

$$g_{kmax}(s_{kp}) \approx \frac{y_{kmax}}{2}.$$

ВЫВОДЫ. Максимальная величина пускового тока при полной компенсации реактивной мощности может быть снижена вдвое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – М.: Энергия, 1965. – 704 с.
2. Муха Н.И., Дудко С.А. Анализ алгоритмов управления судовыми установками компенсации реактивной энергии // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (1). – С. 96–97.

COMPENSATION OF REACTIVE ENERGY IN SHIP ELECTROENERGY SYSTEM AT ASYNCHRONOUS MOTORS STARTING

N. Mukha, S. Pavlenko, S. Dudko

Odessa National Maritime Academy

ul. Didrihsona, 8, Odessa, 65029, Ukraine. E-mail: mykola_mukha@hotmail.com

The processes of dynamical reactive power compensation are considered at starting of asynchronous motors from ship power-station with commensurable power. The results of modeling the direct starting process of electric motor are resulted without compensation and with compensation of motor reactive current in the conditions of commensurability of generator power, changing loading and compensating device. The analysis of asynchronous motor active and reactive resistance changing is done during the direct starting without compensation and with compensation of motor reactive power.

Key words: starting modes of asynchronous electric motors, reactive power, power factor, system of compensation.

REFERENCES

1. Kostenko M.P., Piotrovsky L.M. *Electrical machine*. – М.: Energy, 1965. – 704 p. [in Russian]
2. Mukha N.Y., Dudko S.A. Analysis of control algorithms of compensation reactive power systems in ships electrical power plants // *Energy resource saving problem in electro technical system. Science, education and practice. Scientific journal*. – Kremenchuk: KNU, 2011. – Iss. 1/2011 (1). – PP. 96–97. [in Russian]

Стаття надійшла 10.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Сінчуком О.М.