

УДК 621.371:621.311.4 УДК 621.371:621.311.4

О.І. Дорошенко, канд. техн. наук,
Д.С. Попов, О.М. Івко

ЩОДО ЕКОНОМІЧНОСТІ РЕАКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Анотація. Доведено, що при виборі типу приводу синхронні двигуни не можуть вважатися безкоштовними пристроями компенсації реактивного навантаження системи електропостачання споживачів.

Ключові слова: синхронний двигун, компенсація реактивної потужності, статична стійкість, динамічна стійкість.

A.I. Dorochenko, PhD,
D.S. Popov, A.N. Ivko

ON ECONOMICAL JET LOAD SYNCHRONOUS MOTORS

Abstract. Proved that while choosing the type of a drive synchronous motors should not be considered as free devices that compensate reactive load of electricity consumers.

Keywords: synchronous motor, reactive power compensation, static stability, dynamic stability.

А.И. Дорошенко, канд. техн. наук,
Д. С. Попов, А.Н. Ивко

ОБ ЭКОНОМИЧНОСТИ РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКИ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Доказано, что при выборе типа привода синхронные двигатели не могут считаться бесплатными устройствами для компенсации реактивной нагрузки системы электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: синхронный двигатель, компенсация реактивной мощности, статическая устойчивость, динамическая устойчивость

Як відомо, синхронні двигуни (СД) широко застосовуються як привід промислових установок. Вони мають вентильну або електромашинну систему збудження, і в режимі нормального збудження їх коефіцієнти потужності $\cos \varphi = -0,9$, тобто їх можна використовувати для компенсації реактивного навантаження вузла електричної мережі, від якого вони живляться. При цьому, зважаючи на [1] і [5], складається враження про те, що вони для споживача є безкоштовними джерелами реактивної електроенергії.

Мета цієї роботи – дослідити доцільність застосування СД як безкоштовного компенсатора реактивного навантаження споживача і запропонувати можливий режим управління його реактивною потужністю.

На рис.1,а наведено можливу схему електропостачання споживача від системної підстанції ПС-110/6 кВ, а на рис.1,б – її заступну схему.

Номинальні параметри СД, що застосує споживач за технологією виробництва, наведено на рис.1,а. Якщо коефіцієнт його активного навантаженням $\beta_{СД} = 0,8$, загальне навантаження споживача активне

$$P = 400 + 640 + 0,8 \cdot 800 = 1680 \text{ кВт.},$$

© Дорошенко О.І., Попов Д.С.,

Івко О.М., 2011

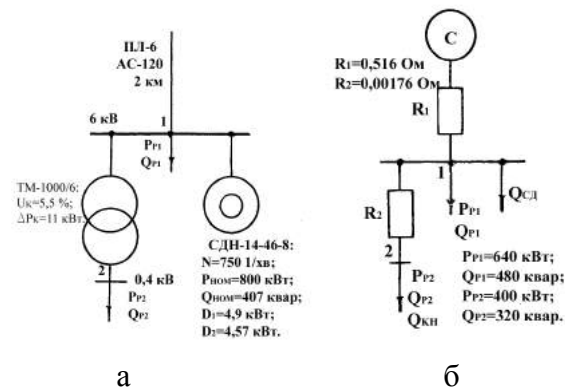


Рис.1. Схема електропостачання споживача:
а – принципова; б – заступна

реактивне $Q = 320 + 480 = 800$ квар.

З [2] відомо, що активна електромагнітна потужність СД визначається за формулою, кВт

$$P_{ЕСД} = \frac{E_{СД} U_C}{X_{\Sigma}} \sin \delta \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

де $E_{СД}$ – електрорушійна сила (ЕРС) синхронного двигуна, кВ; U_C – напруга електроенергетичної системи (ЕЕС), кВ; X_{Σ} – загальний реактивний опір схеми електропередачі, Ом; δ – кут між векторами $E_{СД}$ і U_C .

На рис.2 наведено кутові характеристики СД для різного значення E_{CD} , при цьому $E_{CD1} > E_{CD2}$.

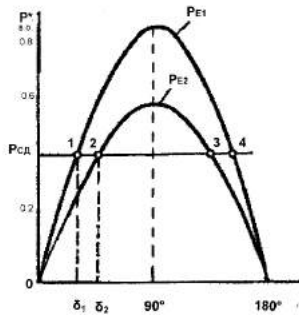


Рис.2. Кутові характеристика СД

Якщо обидві частини (1) розділити на номінальну потужність двигуна $P_{CD,ном}$, то можна одержати

$$\frac{P_{CD}}{P_{CD,ном}} = P_{CD}^* = E_{CD}^* \sin \delta = \beta_{CD}, \quad (2)$$

звідки

$$E_{CD}^* = \frac{\beta_{CD}}{\sin \delta}, \quad (3)$$

де β_{CD} – коефіцієнт навантаження СД активною потужністю.

З [2] відомо, що для нормальної роботи СД коефіцієнт запасу його статичної стійкості має бути

$$K_3 = 1 - \beta_{CD} \geq 0,08 \quad (4)$$

На рис.3 наведено спрощені векторні діаграми СД, що працює з випереджаючим струмом статора за умови $R_\Sigma = 0$ з різним значенням E_{CD} . Його можна розглядати як умовне джерело реактивної електроенергії в системі електропостачання (СЕП) споживача [3].

З ΔAB_1C_1 можна записати:

$$AB_1 = B_1C_1 \operatorname{tg} \varphi = P_{CD} \operatorname{tg} \varphi = \beta_{CD} \operatorname{tg} \varphi = Q_{CD}. \quad (5)$$

Враховуючи (5), з ΔOB_1C_1 отримуємо $OB_1 = OA + AB_1 = U_C + \beta_{CD} \operatorname{tg} \varphi_{CD} = \beta_{CD} \operatorname{tg} \delta$.

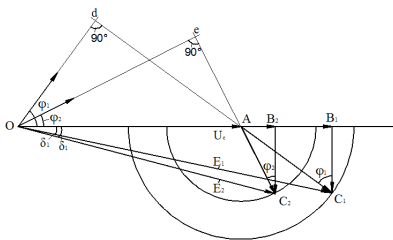


Рис. 3. Спрощена векторна діаграма СД

При цьому кут зсуву фаз між E_{CD} та U_C

$$\delta_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\beta_{CD1}}{1 + \beta_{CD1} \operatorname{tg} \varphi_{CD1}} \right). \quad (6)$$

За умови постійного активного навантаження СД ($\beta_{CD} = \operatorname{const}$) та незмінної напруги ЕЕС ($U_C = \operatorname{const}$) зі зменшенням струму збудження СД зростає кут δ до величини δ_2 і зменшується його реактивна потужність до значення, яке визначається AB_2 .

З [6] відомо, що активні втрати в СД від його реактивного навантаженням Q_{CD} визначаються кВт,

$$\Delta P_{Q_{CD}} = D_1 \frac{Q_{CD}}{Q_{CD,ном}} + D_2 \frac{Q_{CD}^2}{Q_{CD,ном}^2}, \quad (7)$$

де D_1, D_2 – номінальні величини СД, що характеризують його питомі активні втрати на “виробіток” реактивної потужності кВт, вони наводяться в каталогах на синхронні двигуни.

За вимогою норм [5], після застосування компенсації повинна виконуватись умова $\operatorname{tg} \varphi \leq 0,25$. При цьому загальна потужність пристроїв компенсації в СЕП споживача

$$\begin{aligned} Q_{ПК} &= P \left(\frac{Q}{P} - 0,25 \right) = \\ &= 1680 \left(\frac{800}{1680} - 0,25 \right) = 380 \text{ квар.} \end{aligned}$$

Якщо цю потужність одержати від СД, то активні втрати, за формулою (7),

$$\Delta P_{CD} = 4,9 \frac{380}{407} + 4,57 \frac{380^2}{407^2} = 8,279 \text{ кВт.}$$

Активні втрати в трансформаторі ТМ-1000/6 від його реактивного навантаження визначаються

$$\begin{aligned} \Delta P_{T1} &= \frac{Q_2^2}{U_2^2} R_T \cdot 10^{-3} = \\ &= \frac{480^2}{0,4^2} \cdot 0,00176 \cdot 10^{-3} = 2,534 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Активні втрати від реактивного навантаження в кабельній лінії 6 кВ, що живить споживача від системної ПС-110/6 кВ, аналогічно:

$$\Delta P_{КЛ} = \frac{(800 - 380)^2}{6,3^2} \cdot 0,516 \cdot 10^{-3} = 2,293 \text{ кВт.}$$

При цьому загальні активні втрати в електричних мережах споживача від його реактивного навантаження

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma 1} &= \Delta P_{КЛ} + \Delta P_T + \Delta P_{CD} = \\ &= 2,293 + 2,534 + 8,279 = 13,106 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Якщо застосовується компенсація реактивного навантаження на шинах 0,4 кВ ТМ-1000/6 за допомогою конденсаторної установки з конденсаторами 0,4 кВ, її потужність

$$Q_{KH} = P_2 \left(\frac{Q}{P_2} - 0,25 \right) = 640 \left(\frac{480}{60} - 0,25 \right) = 320 \text{ кВар.}$$

Тоді реактивне навантаження трансформатора

$$Q_T = Q_2 - Q_{KH} = 480 - 320 = 160 \text{ кВар.}$$

Активні втрати в трансформаторі і в конденсаторах

$$\Delta P_{T2} = \frac{Q_T^2}{U_2^2} R_T \cdot 10^{-3} + \Delta P_{KH} Q_{KH} =$$

$$= \frac{160^2}{0,4^2} 0,00176 \cdot 10^{-3} + 0,00025 \cdot 320 = 0,362 \text{ кВт.}$$

Реактивне навантаження СД із застосуванням компенсації при напрузі 0,4 кВ може бути

$$Q_{CD} = Q_{PK} - Q_{KH} = 380 - 320 = 60 \text{ кВар.}$$

Тоді активні втрати в СД

$$\Delta P_{CD} = 4,9 \frac{60}{407} + 4,57 \frac{60^2}{407^2} = 0,822 \text{ кВт.}$$

Загальні активні втрати в електричних мережах споживача від його реактивного навантаження у цьому випадку

$$\Delta P_{\Sigma 2} = 2,293 + 0,362 + 0,822 = 3,477 \text{ кВт.}$$

Як можна бачити, загальні активні втрати споживача зменшилися в

$$K = \frac{\Delta P_{\Sigma 1}}{\Delta P_{\Sigma 2}} = \frac{13,106}{3,477} = 3,77 \text{ раз}$$

Це пояснюється великими питомими активними втратами в СД, порівняно до таких втрат в конденсаторах з номінальною напругою 0,4 кВ і з напругою 6 та 10 кВ, які, за даними [4], приймаються при напрузі 0,4 кВ

$\Delta P_{KH} = 0,00025 \text{ кВт/квар.}$ При напрузі 6(10) кВ
 $\Delta P_{KB} = 0,00015 \text{ кВт/квар.}$

В табл.1 наведено розрахунок параметрів режиму СД у відповідності до даних рис.1 від його реактивного навантаження, що свідчить про велику залежність від цього навантаження активних втрат СД.

Очевидно, що для усунення такого явища не зовсім економічно підвищувати активні втрати в СД бо це значно збільшує загальні активні втрати в СЕП споживача, які необхідно оплачувати.

Представляється більш доцільним застосування швидкодіючих систем автоматичного регулювання струму збудження (АРЗ) СД. Таке регулювання дозволяє значно підвищити не тільки статичну стійкість вузла навантаження, але і його динамічну стійкість. При цьому зростає якість напруги в СЕП споживача, що забезпечує плавне регулювання реактивного навантаження і збільшує якість електропостачання.

Висновки

1. Через наявність значних активних втрат, які пов'язані з реактивним навантаженням СД, в супереч нормативному документу [5], їх не можна вважати безкоштовними пристроями компенсації реактивного навантаження для споживача електроенергії.

2. Як показують розрахунки (зокрема, дані в таблиці), реактивне навантаження СД необхідно всіляко обмежувати до мінімуму з попереджувачим, відносно напруги, струмом статора через надто низьку їх економічність як пристроїв компенсації реактивного навантаження СЕП, порівняно з конденсаторними установками.

1. Параметри режиму СД

Параметри СД	Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{CD}$							
	-0,999	-0,99	-0,95	-0,90	-0,85	-0,80	-0,70	-0,60
P_{CD} , кВт	640,0	640,0	640,0	640,0	640,0	640,0	640,0	640,0
$\text{tg} \varphi_{CD}$, в.о.	-0,045	-0,142	-0,329	-0,484	-0,620	-0,750	-1,020	-1,333
Q_{CD} , квар	-29,0	-91,0	-211,0	-310,0	-397,0	-480,0	-653,0	-853,0
S_{CD} , кВ·А	641,0	646,4	673,9	711,1	753,1	800,0	914,3	1066,4
α_M , в.о.	0,721	0,727	0,758	0,800	0,847	0,900	1,028	1,199
δ , град.	37,7	35,7	32,3	30,0	28,1	26,6	23,8	21,2
E_{CD} , в.о.	1,308	1,371	1,497	1,600	1,698	1,787	1,982	2,212
ΔP_{CD} , кВт	0,372	1,324	3,769	6,383	9,128	12,135	19,626	30,343

Δp_{CD} , кВт/квар	0,01283	0,01455	0,01781	0,02059	0,02299	0,02528	0,03005	0,03557
----------------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

де $\Delta p_{CD} = f(\cos\varphi_{CD})$, за умови: $P_{CDном} = 800$ кВт; $Q_{CDном} = 407$ квар; $n_{CDном} = 750$ 1/хв.; $\beta_{CD} = 0,8$ в.о.

3. Спроможність СД до плавного регулювання власного реактивного навантаження (на відміну від регулювання потужності конденсаторних установок, яке можливе, у основному, як ступеневе) дозволяє підвищити якість регулювання реактивного навантаження споживача, підтримуючи його на заданому енергопостачальною організацією рівні.

4. Застосування швидкодіючого регулювання струму збудження СД (його реактивної потужності) дозволяє повною мірою використати його спроможність до підвищення статичної і динамічної стійкості вузла СЕП споживача з будь-якими електроприймачами.

Список використаної літератури

1. Бесараб О. М. Керування збудженням синхронних двигунів з метою зниження перетоків реактивної потужності та сплати за них / О. М. Бесараб, В. Л. Беляєв // Електромашинобуд. та електрообладн. Між від. наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 66. – С. 335 – 336.

2. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников – М.: Высшая школа, 1985. – 427 с.

3. Дорошенко О. І. Щодо “переваги” застосування синхронних двигунів, як джерел реактивної потужності / О. І. Дорошенко // Промелектро. –2008. – № 6. – С. 17– 20.

4. Зубюк Ю. П. Сучасні конденсатори в системах електропостачання / Ю. П. Зубюк // Промелектро, 2004. – № 6. – С. 53 – 55.

5. Нормативний документ. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного та субспоживача). – К.: Об'єднання енергетичних підприємств “Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики”, 2006. – 70 с.

6. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. –М.: Энергия, 1974. – 72 с.

Отримано 10.08.2011

of reactive power and paying for them / Elektromashynobud. and electrical. Interdepartmental the. scientific-technical. Coll. – 2006. – Is.66. – P. 335 – 336 [in Ukrainian].

2. Venykov V. A., Transient electromechanical processes in electric systems. – Moscow: High school, – 1985. – 427 p. [in Russian].

3. Doroshenko A. I. As for the "benefits" and nationally synchronous motors as sources of reactive power / Promoelectro. –2008. – № 6. –P.17–20 [in Ukrainian].

4.. Zubyuk Y. P. Modern capacitors in systems the power supply. / Promoelektro. –2004. – № 6. – P. 53 – 55 [in Ukrainian].

5. Regulatory documents. Methods of identification of economically viable amounts of reactive energy, which flows between the electrical-network supplier of electricity and consumer (primary and minor) – Kiev: Combining energy enterprises «Branch reserve-fund investment energy development», 2006. – 70 p. [in Russian].

6. Instructions for reactive power compensation in distribution networks. – Moscow: Energy, 1974. – 72 p. [in Russian].



Дорошенко
Олександр Іванович,
канд. техн. наук, доц.
каф. ел.постач. Одеськ.
нац. політехн. ун-ту
т.р.7-34-85-48,54-68-86



Попов
Денис Сергійович,
аспірант каф. ел. поста-
чання Одеськ. нац. полі-
техн. ун-ту
тел. 7-34-85-48



Івко
Олександр Миколайович,
студент каф. ел. постачан-
ня Одеськ. нац. політехн.
ун-ту

References

1. Besarab A. M., Belyaev V. L. Manage excitation synchronous engines to reduce overflows