

УДК 621.371: 621.314.4

Левакін М. С.,
Дорошенко О. І., канд., техн. наук

ПРО ОПТИМАЛЬНЕ РЕАКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Анотація. Пропонується оригінальна методика визначення реактивного навантаження синхронних електродвигунів які працюють з випереджаючим струмом статора і використовуються у якості пристроїв компенсації реактивного навантаження систем електропостачання споживачів електроенергії, за якого активні втрати таких двигунів мають мінімальне значення, що позитивно впливає на економіку електроспоживання.

Ключові слова: електроенергетичні системи, компенсація реактивного навантаження, режим реактивного навантаження, синхронного електродвигуна, оптимальна компенсація реактивного навантаження.

Левакин М. С.,
Дорошенко А. И., канд., техн. наук

ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Предлагается оригинальная методика определения реактивной нагрузки синхронных электродвигателей, работающих с опережающим током статора и использованных в качестве устройств компенсации реактивной нагрузки систем электроснабжения потребителей электроэнергии, при котором активные потери таких двигателей имеют минимальное значение, что позитивно влияет на экономику электропотребления.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, компенсация реактивной нагрузки, режим реактивной нагрузки синхронного электродвигателя, оптимальная компенсация реактивной нагрузки

Levakin M. S.,
Doroshenko A. I., PhD

OPTIMAL REACTIVE LOAD OF SYNCHRONOUS MOTORS

Abstract. The original method of determining the reactive load running synchronous motors with a leading current of the stator and are used as compensation devices reactive load power supply systems of electricity consumers, in which the active losses of such engines have the minimum value, which positively affects the economy of power consumption.

Keywords: power system compensation of reactive load, reactive load mode of synchronous motor, an optimal compensation of the reactive load.

Вступ. Свою триєдину задачу: безпечно, економічне та безперебійне постачання споживачам електричної енергії (електроенергії) встановленої державними стандартами якості, електроенергетика здійснює за допомогою своїх технологічних підрозділів – електроенергетичних систем (ЕЕС), підсистемою яких є система електропостачання (СЕП) конкретному споживачеві. При цьому, електроенергію можна розглядати, з одного боку, як фізичне явище, а з іншого – як товарну продукцію ЕЕС, що виробляється промисловим способом (у великих обсягах і, помірко-вано, не дорого).

Спираючись на [1], в роботі [2] було підтверджено, що фізично, електроенергія є енергією електромагнітного поля згаданих систем, яке створюється одночасною дією

напруги і струму провідності струмоведучих частин кожного елемента таких систем в електрично пружному діелектричному середовищі цих елементів. Оскільки, при цьому, вони діють у двох взаємно перпендикулярних напрямках, то електроенергію (як енергію поляризації діелектричного середовища систем, у цілому) можна, умовно, розкласти на активну (уздовж напрямку електропередачі) та реактивну (поперек напрямку електропередачі) електроенергію.

Така перша складова електроенергії передається споживачеві і, за допомогою електромагнітного поля електроприймачів, виконує корисну роботу. Її називають активною електроенергією і позначають літерою P , кВт.

Друга є внутрішньою енергією СЕП і,

фізично, ні до споживача, ні від нього не передається. Її називають реактивною електроенергією і позначають літерою Q , квар. Але її наявність збільшує активні втрати і зменшує пропускну спроможність електричних мереж (ЕЕС і СЕП) та суттєво впливає на рівні їх напруги. Тому величину реактивного навантаження СЕП конкретних споживачів електроенергії необхідно всіляко обмежувати (компенсувати).

Сутність компенсації реактивного навантаження СЕП конкретних споживачів електроенергії полягає у тому, що застосування в них електроприймачів з випереджаючим (відносно напруги) струмом провідності їх струмоведучих частин зменшує загальний струм навантаження, який поступає від джерела живлення і, зазвичай, має відстаючий від напруги характер (рис.1).

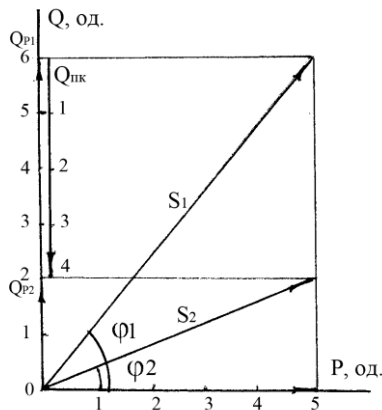


Рис.1. Сутність компенсації реактивного навантаження

Як можна бачити, без застосування компенсації розрахункове реактивне навантаження СЕП споживача електроенергії (як юридичної особи) складає величину Q_{P1} , од. При цьому, його кут зсуву фаз струму відносно напруги складає φ_1 , а його повне навантаження становить S_1 , од.

Застосування в СЕП споживача пристроїв компенсації реактивного навантаження з їх потужністю $Q_{ПК}$ призводить до зменшення реактивного навантаження СЕП до величини, од.

$$Q_{P2} = Q_{P1} - Q_{ПК}, \quad (1)$$

у наслідок чого, кут зсуву фаз струму відносно напруги зменшився до величини φ_2 , а

повне розрахункове навантаження СЕП – до величини S_2 , од.

При цьому зменшується загальний струм провідності від джерела живлення споживача, зменшуються активні втрати в електричних мережах електропостачальних організацій (ЕО) і споживача, збільшується їх пропускну спроможність та зростає їх напруга.

Як відомо, синхронні електродвигуни (СД) у нормальному режимі роботи працюють у режимі перезбудження. Тому струм їх статора випереджає його напругу на фазовий кут φ , град. Через те, що застосування СД в СЕП конкретних споживачів електроенергії визначається технологією виробництва, то їх вважають безкоштовними «джерелами» реактивної електроенергії і тому, у відповідності до вимог нормативного документа [3], намагаються навантажувати до максимально допустимої реактивної потужності. При цьому, реактивна енергія вважається товарною продукцією, вартість якої визначають за нормативним документом [4].

Зважаючи на сучасність вимоги економного використання енергоресурсів України, задачею цього дослідження є розроблення методики визначення реактивного навантаження СД, залежно від їх навантаження активною потужністю.

Результати дослідження. Оскільки в [5] доведено, що реактивна електроенергія є поперечною складовою енергії електромагнітного поля будь-якої ЕЕС з подвійним синусоїдальним характером зміни протягом періоду, то пропонується у розрахунках режимів СЕП використовувати не амплітудне її значення (як зазвичай), а діюче, що визначається за формулою, квар

$$Q_d = Q_p / \sqrt{2}, \quad (2)$$

де Q_p - розрахункове значення реактивної потужності, визначене за даними комерційного обліку енергії у розрахунковому періоді (максимальне із середніх, на інтервалі опосередкування 30 хвилин), квар.

При цьому, в математичному середовищі MATHCAD математичну модель електромагнітного поля СД можна представити у вигляді

рис.2.

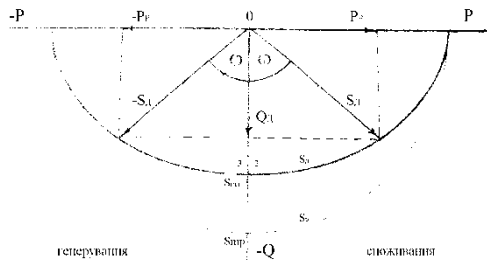


Рис.2. Математична модель електромагнітного поля СД

Спираючись на фізику створення електромагнітного поля СД, можна стверджувати, що знак мінус його реактивної потужності свідчить про перевагу процесів стиснення його діелектричного середовища за рахунок переважаючої дії на нього напруги. Зважаючи на це, математична модель для розрахунку нормального режиму СЕП електропостачання СД можна представити у вигляді рис.3.

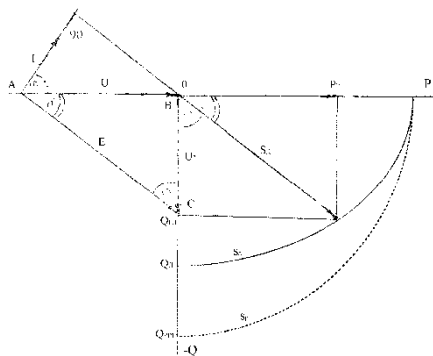


Рис.3. Математична модель електропостачання СД

Як можна бачити

$$\left. \begin{aligned} U_1 &\equiv P_p \\ U_2 &\equiv Q_d \\ E &\equiv S_d \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де U_1 - поздовжня складова напруги джерела живлення СД в максимальному режимі навантаження, кВ; U_2 - поперечна складова напруги живлення СД у згаданому режимі; S_d - діюче значення повної потужності СД, що визначається за формулою, кВА

$$S_d = \sqrt{P_p^2 + (Q_d / \sqrt{2})^2} = \sqrt{P_p^2 + Q_d^2 / 2}; \quad (4)$$

P_p - розрахункове активне навантаження СД конкретного споживача, кВт; E - електро-рушійна сила самоіндукції електромагнітно-

го поля СЕП у максимальному режимі навантаження, кВ; Q_d - діюче значення реактивної потужності СД, що визначається за формулою (2), квар.

За рекомендацією [6], у якості економічного еквівалента реактивної потужності СД можна використовувати діюче значення його коефіцієнта реактивної потужності, в.о.

$$\operatorname{tg} \varphi_d = Q_d / (\sqrt{2} \cdot P_p), \quad (5)$$

де P_p - активне розрахункове навантаження СД, що визначається за відомою формулою, кВт

$$P_p = \beta_{CD} \cdot P_{НОМ}; \quad (6)$$

β_{CD} - коефіцієнт навантаження СД активною потужністю, в.о.

Як відомо, загальні активні втрати СД визначаються за відомою формулою, кВт

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_X + \Delta P_H, \quad (7)$$

де ΔP_X - активні втрати холостого ходу, кВт;

ΔP_H - активні навантажувальні втрати, які можна представити у вигляді, кВт

$$\Delta P_H = \Delta P_P + \Delta P_Q; \quad (8)$$

ΔP_P - навантажувальні активні втрати, зумовлені тільки активним навантаженням, кВт

$$\Delta P_P = P_p^2 / U_{НОМ}^2 \cdot R \cdot 10^{-3}; \quad (9)$$

ΔP_Q - навантажувальні активні втрати, зумовлені реактивним навантаженням, кВт

$$\Delta P_{Q1} = Q_d^2 / U_{НОМ}^2 \cdot R \cdot 10^{-3}; \quad (10)$$

R - активний опір обмотки статора, приведений до його номінальної напруги, Ом.

Зважаючи на рекомендацію [3], втрати ΔP_Q можна визначити за формулою, кВт

$$\Delta P_{Q2} = A \cdot Q_d^2 / Q_{НОМ}^2 + B \cdot Q_d / Q_{НОМ}, \quad (11)$$

де A, B - розрахункові паспортні коефіцієнти конкретного СД з номінальною реактивною потужністю $Q_{НОМ}$, кВт.

Приймаючи активні втрати тільки від реактивного навантаження за умовну одиницю, рівняння (6) можна представити у вигляді, в.о.

$$\begin{aligned} \Delta P_H^* &= \Delta P_P / \Delta P_Q + \Delta P_Q / \Delta P_Q = \\ &= (\operatorname{tg} \varphi_d^2 + 1) \cdot \Delta P_{Q2} = \\ &= (1 / \operatorname{tg} \varphi_d^2 + 1) \cdot \Delta P_{Q2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Активні втрати холостого ходу СД можна визначити за допомогою рівняння (5), за умови його номінального активного навантаження, коли $\beta_{CD} = 1$. При цьому загальні активні втрати двигуна можна визначити за відомою формулою, кВт

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{НОМ} \cdot (1 - \eta) = \Delta P_X + \Delta P_{НОМ}, \quad (13)$$

де η - номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна за номінального активного навантаження, в.о.; $\Delta P_{НОМ}$ - загальні навантажувальні втрати, визначені за формулою (6), при повному номінальному навантаженні, кВА.

Можна пропонувати наступну методику визначення оптимального реактивного навантаження, за якого його загальні навантажувальні втрати мають мінімальне значення при відомому його активному навантаженні:

1. За формулою (13) визначаються загальні активні втрати двигуна при його номінальному навантаженні ΔP_{Σ} , кВт.

2. Спираючись на формулу (12) визначаються загальні навантажувальні втрати при номінальному навантаженні двигуна за умови: $\text{tg} \varphi_D = \text{tg}(a \cos \varphi_{НОМ})$ в.о. та ΔP_{Q2} , що визначаються за формулою (11), кВт.

3. Спираючись на формулу (7), визначаються активні втрати холостого ходу, кВт

$$\Delta P_X = \Delta P_{\Sigma} - (1 / \text{tg} \varphi + 1) \cdot \Delta P_{Q2}.$$

4. За відомого незмінного активного навантаження СД ($\beta_{CD} = \text{const}$) з кроком $\Delta \text{tg} \varphi_D = 0,001$, змінюють значення діючого коефіцієнта його реактивного навантаження в межах $(0,25 \dots 1,5) \cdot \text{tg} \varphi_{НОМ}$ і визначають навантажувальні активні втрати двигуна від його реактивного навантаження за формулою (11), кВт.

5. За формулою (7) визначають загальні активні втрати двигуна на кожному кроці розрахунку, кВт.

6. У якості розрахункового економічно доцільного значення коефіцієнта реактивного навантаження двигуна приймається таке його значення, за якого $\Delta P_{\Sigma i} = \min$.

Розглянемо приклад оптимізації реактивного навантаження синхронного електродвигуна типу СДН-14-49-6 з номінальними

параметрами: напруга 6 кВ; активна потужність 1000 кВт; реактивна потужність 511 квар; $-0,9$ в.о.; ККД 95,37 %; розрахункові коефіцієнти: $A = 5,09$ кВт, $B = 3,99$ кВт.

Розрахунок виконується в математичному середовищі MATCAD, а його результати представлено на рис.4 і в таблиці 1. При цьому β_{CD} змінюється в межах $1,0 \dots 0,1$ в.о.

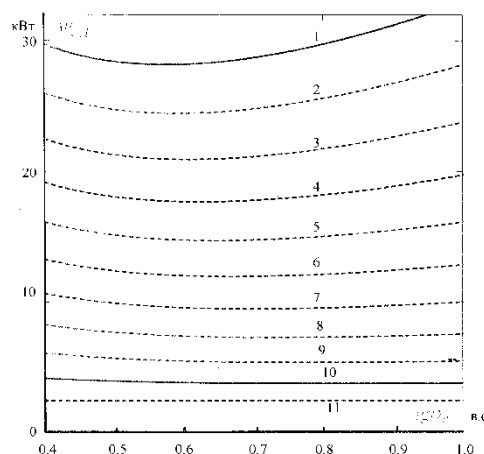


Рис.4. Залежність $\Delta P_{CD\Sigma} = f(\text{tg} \varphi_{PD})$

Таблиця 1 - Результати розрахунку

β_{CD} , в.о.	ΔP_{CD} , кВт	Q_{CD} , квар	d_{CD} , кВт/квар
1,0	28,193	570	0,04946
0,9	24,444	531	0,04603
0,8	20,941	488	0,04231
0,7	17,687	437	0,04043
0,6	14,688	390	0,03766
0,5	11,947	337	0,03540
0,4	9,471	282	0,03352
0,3	7,268	223	0,03252
0,2	5,350	160	0,03344
0,1	3,733	87	0,04266

Висновок. Економічність СД, як пристрою компенсації реактивного навантаження, суттєво залежить від тієї частини втрат активного навантаження, яка зумовлена реактивним навантаженням, що в свою чергу має бути враховано при оптимізації.

Список використаної літератури

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [текст] / Л. А. Бессонов Изд. 6-е. Учебник для студ. энергетич. и электротехнич. вузов. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с.

2. Дорошенко, О. І. Про математику і фі-

зику електропередачі [текст] / О. І. Дорошенко // Матеріали X-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Новини наукової думки» 22–30 жовтня 2014 р., Прага. – С. 15 – 22.

3. СОУ-Н МРЕ 40.1.20.510:2010. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача) [текст]. – Київ., 2006. – 48 с.

4. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затверджена наказом Міністерства палива та енергетика України № 19 від 17.01.2002 [текст] / Офіційний вісник України. – 2002. – № 48. – С. 71 – 147.

5. Дорошенко О. І. Визначення впливу реактивного навантаження електроенергетичної системи на виток її електроенергії [текст] / О. І. Дорошенко, К. С. Гусак, О. В. Романюк // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – Київ: Техніка, 2015. – Вып.20 (96). – С. 22 – 29.

6. Дорошенко О. І. Про економічний еквівалент реактивної потужності систем електропостачання [текст] / О. І. Дорошенко // *Технологічний аудит і резерви виробництва*. – 2014. – №6/5 (20). – С. 26 – 30.

Одержано 22.04.2016 р.

References

1. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovi elektrotehniki* Izd. 6-e. Uchebnik dlya stud. enerhetich. i elektrotehnich vuzov [Theoretical foundations of electrical engineering. Ed. 6. a Textbook for students energetic and electro technical universities]. (1973), Higher School, Moscow, 752 p. (In Russian).

2. Doroshenko O. I. Pro matematyku i fizyku elektroperedachi [About mathematic and physic of electric power transmission]. (2014), *Materials of X-th International Scientific and Practical Internet Conference "News of scientific thought"*, Prague, pp. 15 - 22. (In Ukrainian).

3. SOU-N MPE 40.1.20.510:2010. Metodika viznacheniy ekonomichno dozilnich obciativ kompensaziy reaktivnoy enerhiy, yaka peretikaє

mig elektrichnimi meredzami elektroperedavalnoy jrganizaziy ta spogivacha (osnovnoho ta subspogivacha) [SOU-N MPE 40.1.20.510:2010. Method of determining economically viable amounts of reactive power compensation, which flows between the power grids for electricity and consumer organizations (primary consumers and secondary consumers)].(2006), Kiev, 48 p. (In Ukrainian).

4. Metodika obchisleniy plati za peretikanie reaktivnoy elektroenergiy mig elektroperedavalnoy organizaziy tai y spogivachai. Zatverdzena nakazom Ministrstvo paliva ta energetiki Ukraini № 19 vid 17.01.2002 [The method of calculation of fees for reactive power flow for Electricity between an organization and its customers. Approved by the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine of 17.01.2002 № 19]. (2002), Official Bulletin of Ukraine, No. 48, pp. 71 – 147. (In Ukrainian).

5. Doroshenko O. I., Husak K. S., Romaniuk O. V. Vznachennya vpliva navantazhennya elektroenergetychnoy systemy na vityk її електроенергії [Determining the impact of reactive load power system to turn its electricity]. (2015), *Electrotechnical and computer systems*, Kiev: Technology, Vol.20 (96), pp. 22 – 29. (In Ukrainian).

6. Doroshenko O. I. Pro ekonomichniy ekvivalent reaktivnoy potugnosti system elektroposnfchaniy. [On the economic equivalent of reactive power power supply systems]. (2014), *Technology audit and production reserves*, №6/5 (20), pp. 26 – 30. (In Ukrainian).



Левакін
Максим Сергійович,
маг. каф. електропостачання
та енергоменеджменту
Одеського нац. політехн. ун-ту.
м/т: 050-146-01-80.
e-mail: madmaxlad@mail.ru



Дорошенко
Олександр Іванович,
к.т.н., доц. каф. ел. поста-
чання та енергоменеджмен-
ту Одеського нац. політехн.
ун-ту.
м/т: 067-267-95-89,
e-mail: dai1938@yandex.ua

