

**МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА  
КОНСУМИРАНАТА И ГЕНЕРИРАНА РЕАКТИВНА МОЩНОСТ ОТ  
ЕЛЕМЕНТИ НА ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИТЕ СИСТЕМИ НА  
ПРОМИШЛЕНИ ОБЕКТИ**

**Е. Р. Кърцелин<sup>1</sup>, Г. Ц. Велев<sup>2</sup>, Н. С. Минеков<sup>3</sup>, Ц. К. Върбов<sup>2</sup>, Р. А. Александров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Минно-геоложки Университет "Св. Иван Рилски", София

<sup>2</sup>Технически Университет – Габрово

<sup>3</sup>„Асарел Медет“ АД, гр. Панагюрище

**MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING THE CONSUMED AND  
GENERATED REACTIVE POWER FROM ELEMENTS OF THE POWER  
SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL SITES**

**E. R. Kartselin<sup>1</sup>, G. Ts. Velev<sup>2</sup>, N. S. Minekov<sup>3</sup>, Ts. K. Varbov<sup>2</sup>, R. A. Alexandrov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" - Sofia

<sup>2</sup>Technical University of Gabrovo

<sup>3</sup>Assarel-Medet JSC, Bulgaria

**Abstract**

*Reactive load compensation is still one of the effective solutions for increasing efficiency and reducing losses in the transmission and conversion of electricity. The paper inhere proposes generalized and practically applicable models for determining the reactive power consumed or generated by the elements of the power supply systems of industrial sites (PSS of IS), of public and residential buildings.*

**Keywords:** reactive power, mathematical models for determining the consumed and generated power of the elements of PSS of IS.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Използването на статични тиристорни компенсатори (СТК) позволява комплексно да се решават проблемите на електро-магнитната съвместимост и компенсацията на реактивната мощност.

На промишлените предприятия са намерили приложение два типа СТК: с права и косвена компенсация.

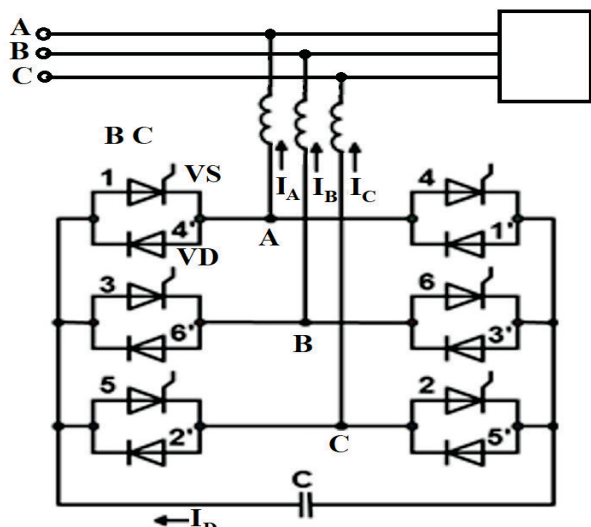
СТК се използват най-широко в системите за електрооснабдяване на редица производства в металургията и в дъговите пещи за променлив ток, което осигурява възможност за намаляване нивото на колебание на напрежението и коефициента на несинусоидалност и несиметрия на напрежението, а също така и за повишаване на фактора на

мощност  $\cos\varphi$  на тези електропотребители. В литературата [1 - 3] са приведени схеми и параметри на СТК с мощност до 180 MVA<sub>r</sub>. Опитът от експлоатацията на ТСК показва, че най-надеждни се явяват СТК с косвена компенсация.

Бързодействащите статични тиристорни компенсатори на реактивна мощност са перспективно решение при наличие на електропотребители с импулсен режим на работа (ЕПИ) за компенсирането на реактивна мощности повишаване на качеството на електроенергията, чиято схема е показана на фиг.1.

Принципът на действие на този тип статични компенсатори на реактивна мощност се заключава в регулирането на напрежението на филтърен дросел  $L_1$ , както по

амплитуда, така и по фаза за сметка на изменението на напрежението на изхода на тиристорния ШИМ-преобразувател [5].



фиг. 1. Бързодействащ статичен тиристорен компенсатор на реактивна мощност

Този тип компенсатори имат предимства пред СТК:

- Позволяват да се генерира и регулира потокът на реактивна мощност, както с капацитивен, така и с индуктивен характер;
- Имат по-високо бързодействие;
- Имат по-големи функционални възможности при управлението на изходния ток;
- Имат по-добри специфични масогабаритни показатели.

Следва да се отбележи, че те се явяват един от основните елементи при реализацията на гъвкави линии.

Към недостатъка на този тип компенсатори трябва да се посочи високата им цена.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### 1. Математически модели за определяне на реактивната мощност, генерирана от източници на реактивна мощност

Ще се разгледат различни елементи от електроснабдителните системи на промишлените обекти и ще се представят систематизирано математически зависимости за определяне на реактивната мощност, консумирана от тях, както и изрази за пресмятане на генерираната реактивна мощност от често използвани в практиката средства за компенсация на реактивните товари.

### 1.1. Електропроводни линии

За определяне на генерираната реактивна мощност от електропроводни кабелни линии се използва израз

$$Q = U^2 b_o l; \quad (1)$$

$$b_o = 2\pi f C_p,$$

където:

$Q$  – реактивна капацитивна мощност, генерирана от електропроводна линия, kVAr;

$b_o$  – специфична реактивна проводимост на кабели, S/km;

$l$  – дължина на електропроводната линия, km;

$C_p$  – специфичен работен капацитет на кабела, F/km.

### 1.2. Кондензаторни уредби (КУ)

Генерираната /отдавана/ реактивна мощност от КУ се определя по израз

$$Q_k = U^2 \omega C_k; \quad (2)$$

$$Q_{KY} = P_{cp} (tg\varphi_1 - tg\varphi_2),$$

където:

$Q_k$  – реактивна мощност, генерираната от КУ, kVAr;

$C_k$  – капацитет на кондензатора, F;

$Q_{KY}$  – необходима реактивна мощност на КУ, kVAr;

$P_{cp}$  – средногодишен активен товар, kW;

$tg\varphi_1$  – тангес на ъгъл  $\varphi$ , който съществува до компенсирането на реактивната мощност;

$tg\varphi_2$  – тангес на ъгъл  $\varphi$ , който се изисква след използването на компенсиране на реактивна мощност;

$\omega$  – ъглова честота, rad/s.

### 1.3. Синхронни двигатели

Максималната компенсираща способност на синхронни двигатели (СД) в експлоатация се определя по израз

$$q_{max} = \frac{Q}{S} 100 = \left[ \sin\varphi + (1 - \beta) \cdot \left( \frac{\sin\varphi}{48\sin\varphi - 32} + 0,4 \right) \right] 100 \quad (3)$$

$$Q_{max} = \frac{\alpha_{max} P_{ном} tg\varphi_{ном}}{\eta_{ном}} \quad (4)$$

където:

$q_{max}$  – максимална компенсираща способност на СД, %;

$\beta$  – коефициент на натоварване на СД по активна мощност;

$Q_{max}$  – максимална реактивна мощност, която е възможно да генерира СД, kVAr;

$\alpha_{max}$  – максимално допустимо претоварване на СД по реактивна мощност;  
 $P_{ном}, tg\varphi_{ном}, \eta_{ном}$  – съответно номинална мощност, тангес от  $\varphi_{ном}$  и КПД на СД.

#### 1.4. Синхронни компенсатори

Отдаваната (генерираната) реактивна мощност от синхронни компенсатори се определя по изрази:

$$Q_{СК} = \frac{E_q^2}{X_{d\Sigma}} \frac{X_c}{X_{d\Sigma}} + \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \left(1 - \frac{2X_c}{X_{d\Sigma}}\right) - \frac{U^2}{X_{d\Sigma}} \left(1 - \frac{X_c}{X_{d\Sigma}}\right), \quad (5)$$

където:

$Q_{СК}$  - реактивна мощност, отдавана от синхронни компенсатори (СК);

$E_q$  – изчисл. стойност на е.д.с. на СК;

$X_c$  - съпротивление на ел. мрежа,  $\Omega$ ;

$X_{d\Sigma}$  - заместващо съпротивление на СК (изчислителна стойност)  $\Omega$ .

## 2. Математически модели за определяне на реактивната мощност, консумирана от асинхронни електродвигатели чрез използване на каталожните им данни

Реактивната мощност, консумирана от асинхронни двигатели се определят по формулите с използване на каталожните (паспортните) им данни, показани в Таблица 1.

В Таблица 1 са приети следните означения:

$I_{прх}$  - ток на празен ход на АД, А;

$I_{ном}$  - номинален ток на АД, А;

$P_{ном}$  - номинална мощност на вала на АД, kW;

$\beta$  – коефициент на натоварване на АД;

$Q_{ном}$  – номинална реактивна мощност на АД, kVAr;

$\cos\varphi_{ном}, \eta_{ном}$  - съответно номинален фактор на мощност ( $\cos\varphi$ ) и номинален коефициент на полезно действие;

$K_{max}$  - коефициент на максимума по активна мощност;

$P_{см}, Q_{см}$  - средна стойност на активната и реактивна мощност, консумирана от група електропотребители през най-натоварената смяна, kVAr;

$K'_{max}$  – коефициент на максимума по реактивна мощност.

Таблица 1

№	Определяна величина	Формула
1	Реактивна мощност на намагнитване на асинхронен двигател	$Q_\mu = \frac{I_x P_{ном}}{I_{ном} \eta_{ном} \cos\varphi_{ном}}$
2	Реактивна мощност на полето на разсейване	$Q_r = \frac{\beta^2 P_{ном}}{(P\eta_{ном}) \left( tg\varphi_{ном} - \frac{I_x}{I_{ном} \cos\varphi_{ном}} \right)}$
3	Реактивна мощност при работа на празен ход на асинхронен двигател	$Q_x = \frac{Q_{ном} (2,22 - 2,12 \cos\varphi_{ном})}{tg\varphi_{ном}}$
4	Консумирана реактивна мощност от група асинхронни двигатели	$\begin{aligned} \Sigma Q &= K_{max} Q_{см} \\ &= K_{max} P_{см} tg\varphi; \\ \Sigma Q &= K'_{max} Q_{см} \end{aligned}$

## 3. Практически случай за подобряване на фактора на мощност на трифазен асинхронен двигател

Разгледан е следният практически случай:

На табелката на трифазен асинхронен електродвигател са посочени следните данни:

- $P = 40 \text{ kW}$**  - мощност на двигателя;
- $U_H = 400 \text{ V}$**  - номинално захранващо линейно напрежение;
- $I_H = 105 \text{ A}$**  - номинален статорен ток;
- $\eta = 0,85$**  - к.п.д. на двигателя;
- $f = 50 \text{ Hz}$**  - честота на захранващото напрежение.

На табелката е посочено, че намотките на статора на двигателя са свързани в триъгълник.

От табелката на двигателя не може да се получи информация за стойността на фактора на мощност  **$\cos\varphi$** .

Да се решат следните задачи:

1. Да се определи стойността на фактора на мощност на двигателя  **$\cos\varphi$**
2. Да се определи с каква стойност ще се намали статорния ток на двигателя, ако фактора на мощност са увеличи да стойност  **$\cos\varphi = 1$**  с помощта на кондензатори.

3. Да се определи капацитета на кондензаторите, за да се повиши фактора на мощност на двигателя до стойност  $\cos \varphi = 1$ .
4. Да се определи каква реактивна мощност ще се компенсира с включването на кондензаторите при  $\cos \varphi = 1$ .

Решение:

1. Определяне на консумираната от двигателя мощност:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{40}{0.85} = 47 \text{ kW}$$

$P_2$  – мощност, която се развива от двигателя и се посочва на табелката ( $P_2 = 40 \text{ kW}$ )

2. Определяне фактора на мощност на двигателя с:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_1 \cdot \cos \varphi;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_1} = 0,65$$

4. Определяне статорния ток на двигателя при фактор на мощност,  $\cos \varphi = 1$ :

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2$$

$$\cos \varphi_2 = 1 \rightarrow P_1 = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I$$

$$I = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{47000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 67,8 \text{ A.}$$

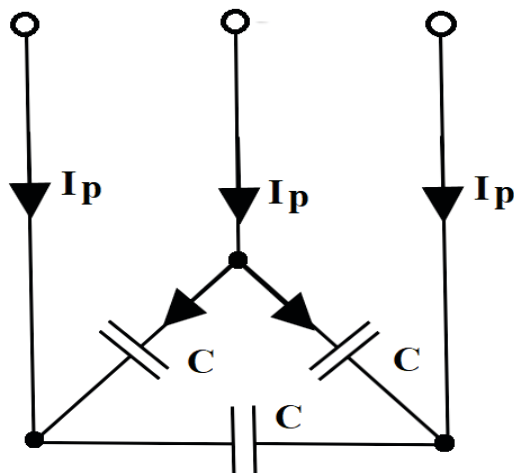
Получената стойност на тока е активния ток при  $\cos \varphi = 0,65$ , тъй като  $I_a = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 105 \cdot 0,65 = 67,8 \text{ A}$

Намагнитващият (реактивният) ток, който протича в захранващите (линейни) проводници до подобряването на фактора на мощност ще бъде  $I_P = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 105 \cdot 0,76 = 80,1 \text{ A}$ .

4. Избор на кондензатори за кондензаторната група

Кондензаторите от фиг. 2 се свързват в триъгълник, като до подобряването на фактора на мощност в линейните проводници протича реактивен ток  $I_P = 79,8 \text{ A}$ . Фазният ток, който ще протече през кондензаторите ще бъде с  $\sqrt{3}$  по-малък, т.е.  $I_C = \frac{I_P}{\sqrt{3}} = \frac{80,1}{\sqrt{3}} = 46,3 \text{ A}$ .

Напрежението на всеки кондензатор е равно на линейното напрежение на мрежата  $400 \text{ V}$ .



Фиг. 2 Схема на свързване на кондензаторните батерии

Капацитивното съпротивление на кондензатора ще бъде:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{U}{I_C}$$

От горната формула се определя капацитета на кондензатора:

$$C = \frac{I_C}{U \omega} = \frac{46}{400 \cdot 314} = 368 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 368 \mu\text{F}.$$

Към трифазния двигател трябва да бъде свързан кондензаторен блок с общ капацитет:  $C = 3 \cdot 368 = 1104 \mu\text{F}$  в резултат, на което факторът на мощност ще се повиши до  $\cos \varphi_2 = 1$ , а токът в мрежата ще се намали от  $105 \text{ A}$  до  $67,8 \text{ A}$ .

Определяне на общата реактивна мощност, която се осигурява от кондензаторите:  $Q = 3 \cdot U \cdot I_C = 3 \cdot 400 \cdot 46,3 = 55560 \text{ VAR} = 55,6 \text{ kVAR}$ .

В този случай двигателят ще консумира от мрежата само активна мощност  $P_1 = 47 \text{ kW}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Компенсирването на реактивните товари в елементите на електроенергийните системи на промишлените обекти е актуална задача за изследване и решаване в областта на съвременната енергетика и с голям икономически ефект.

2. Предложени са обобщени математически модели за определяне на консумираната и генерираната реактивна мощност от различни елементи на електроенергийните системи.

3. Предложени са математически изрази за определяне на реактивната мощност, консумирана от асинхронни двигатели чрез използване на паспортните им данни.

## REFERENCE

- [1] Минеков, Н., Загуби на мощност и енергия в елементите на електроснабдителните системи на промишлените обекти, ИК „Св, Иван Рилски, 2020 // Minekov, N., Zagubi na moshtnost i energia v elementite na elektro-snabditeľnite sistemi na promishlenite obekti, IK „Sv, Ivan Rilski, 2020.
- [2] Жежеленко, И. В., А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, И. А. Нойбергер, Электромагнитная совместимость потребителей. М. Машиностроение, 2012 // Zhezhelenko, I. V., A. K. Shidlovskii, G. G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, I. A. Noyberger, Elektromagnitnaya sovmestimost potrebiteley. M. Mashinostroenie, 2012.
- [3] Железко, Ю. С., А. В. Артемович, В. Савченко Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М. ИЦ „ЭНАС“, 2003 // Zhelezko, Yu. S., A. V. Artemovich, V. Savchenko Raschet, analiz i normirovanie potery elektroenergii v elektricheskikh setyah. M. ITs „ENAS“, 2003.
- [4] Красик, В. В., Управление электрохозяйством предприятия. М., изд. ИЦ „ЭНАС“, 2005 // Krasik, V. V., Upravlenie elektrohozyastvom predpriyatii. M., izd. NTs „ENAS“, 2005.
- [5] Мелузин, Г., Примеры и задачи по электротехнике (перевод со словацкого), М., Энергия, 1979 // Meluzin, G., Primeray i zadachi po elektrotehnike (perevod so slovatskogo), M., Energia, 1979.
- [6] Наредба № 3 за устройството на електрическите уредби и електро-проводните линии. Обн. в ДВ бр.90 и 91, 2004 // Naredba № 3 za ustroystvoto na elektricheskite uredbi i elektro-provodnite linii. Obn. v DV br.90 i 91, 2004.
- [7] Krasimir Ivanov, Ivaylo Stoyanov, Krasimir Alexandrov, Tzvetan Naumov: A Study of Some Parameters of the Quality of Electric Energy Distributed in Close Proximity to Small Hydropower Plants, Scientific Forum on Innovative Trends in Engineering and Science - SFITES 2015, 05. 2015.
- [8] Иванов, Кр. М., И. Йотов, Изследване на мрежи 20 kV с разпределена генерация, Международна конференция UNITECH 2015, Габрово, 20 - 23.11.2015, Том 1, стр. 144-159 // Ivanov, Kr. M., I. Yotov, Izsledvane na mrezhii 20 kV s razpredelena generatsia, Mezhdunarodna konferentsia UNITECH 2015, Gabrovo, 20 - 23.11.2015, Tom 1, str. 144-159.
- [9] Иванов, Кр. М., Н. Михайлов, Ц. Наумов, Влияние на зарядните станции за автомобили върху някои параметри на електрическата енергия, XXVII Международна конференция по електроника - ET2018, 13-15 септември, 2018, Созопол, България // Ivanov, Kr. M., N. Mihaylov, Ts. Naumov, Vliyanie na zaryadnite stantsii za avtomobili varhu nyakoi parametri na elektricheskata energia, XXVII Mezhdunarodna konferentsia po elektronika - ET2018, 13-15 septemvri, 2018, Sozopol, Bulgaria.
- [10] Иванов, Кр. М., П. Петров, Моделиране на трифазен трансформатор с помощта на програмата PSpice, “Известия” на ТУ-Габрово, том XXV, 2001, с. 25 – 32, ISSN 1310 – 6686 // Ivanov, Kr. M., P. Petrov, Modelirane na trifazen transformator s pomoshhta na programata PSpice, “Izvestia” na TU-Gabrovo, tom XXV, 2001, s. 25 – 32, ISSN 1310 - 6686
- [11] Hristova, T. V., A. B. Yanev, N. V. Savov, Determination of the Influence of Jaw Movement Frequency of Jaw Crusher on Energy Consumption, Annals of the University of Petroşani, Electrical Engineering, 20 (2018), p. 29-36 EBSCO
- [12] Ivanov K. M., Iv. M. Stojanov, Measurements of Electromagnetic Compatibility in Distributed Power Generation, Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series, Vol.4, 2014, Romania
- [13] Gankova-Ivanova, Zw., Wirtschaftliche Herausforderungen der Digitalisierung der Energetik, 30 Years FDIBA, Proceedings of the 9th FDIBA Conference, Sofia, Bulgaria, 26-27 November, 2020, S. 51-54