

## ОПТИМИЗАЦИЯ НА ВЪЗБУЖДАНЕТО НА ГРУПА СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ

**Николай Минев**

Асарел - Медет" АД, гр. Панагюрище

**РЕЗЮМЕ.** Представен е метод за оптимизация на възбудането на група мощни синхронни двигатели.

**Ключови думи:** Синхронни двигатели, оптимизация на възбудането, компенсация на реактивни товари.

### OPTIMIZATION OF GROUP SYNCHRONOUS MOTORS EXCITATION

**Nikolai Minekov**

„Asarel-Medet” AD, Panaguriste

**ABSTRACT.** A method of group powerful synchronous motor excitation optimization is presented in the paper.

**KEY WORDS:** excitation optimization, reactive load compensation, synchronous motors

### Въведение

В редица промишлени предприятия (обогатителни фабрики, циментови заводи и други) се намират в експлоатация по няколко групи разнотипни синхронни двигатели. Елементите на загубите  $A$  и  $B$ , зависещи от реактивната мощност, за тези двигатели са съществено различни. Ето защо за компенсацията на една обща стойност на реактивен товар на предприятието  $Q_k$  е необходимо да се определи икономически най-целесъобразното разпределение между отделните синхронни двигатели.

Практически дадената задача се решава чрез определянето на оптимален вариант за възбудане на синхронните двигатели, участващи в компенсацията.

Под оптимален вариант за режима на възбудане на синхронните двигатели следва да се разбира такова разпределение на реактивния товар  $Q_k$  между отделните двигатели, при които сумарните загуби на активна мощност  $P_p$ , зависещи от произведената и разпределена реактивна мощност, да бъдат минимални. При това следва да се отчете, че за големината на възбудителния ток на синхронния двигател се налагат ограничения, определени по условието за устойчива работа на двигателя и по условието за допустимо нагряване на възбудителната намотка.

### Метод на относителното нарастване на загубата на активна мощност.

За определяне на оптималния режим на възбудане на синхронните двигатели се разглежда метода на

относителните нараствания. За определяне на относителните нараствания се определя първата производна на израза за активните загуби  $P_p$ , зависещи от реактивната мощност, т.е.:

$$\delta = \frac{dP_p}{dQ} \quad (1)$$

За синхронни двигатели изразът (1) има следното представяне:

$$\delta = \frac{dP_p}{dQ} = \frac{2AQ}{Q_H^2} + \frac{B}{Q_H} \quad (2)$$

Загубата на активна мощност, зависеща от реактивната, се определят по израза:

$$P_p = A\alpha^2 + B\alpha, \quad (3)$$

където

$$A = P_{cH} \sin^2 \varphi_n + \left( \frac{1 - k_{f1}}{\alpha'} \right)^2 P_{jn}, \quad (4)$$

$$B = \frac{2P_{jn} k_{f1} (1 - k_{f1})}{\alpha'} \quad (5)$$

Стойността на коефициента  $k_f$  се определя с израза:

$$k_{f1} = \frac{I_{f1}}{I_{jn}} = \sqrt{\frac{1 + \beta^2 x_{*d}^2 \cos^2 \varphi_n}{1 + x_{*d}^2 + 2x_{*d} \sin \varphi_n}} \quad (6)$$

Относителното натоварване на статора на синхронния двигател по реактивна мощност се определя по израза:

$$\alpha' = \frac{\sqrt{1 + 2x_{sd} \sin \varphi_n + x_{sd}^2 (1 - \beta^2 \cos^2 \varphi_n)} - 1}{x_{sd} \sin \varphi_n}, \quad (7)$$

където

$$\beta = \frac{P}{P_n} - \text{относително натоварване на статора по активна}$$

мощност.

Поставя се задачата: Да се построи графическа зависимост  $\delta = f(Q/Q_n)$  при работа с товар  $\beta = 0,5$ ;  $1$ ;  $1,5$  за синхронен двигател със следните технически данни:

$S_n = 14000 \text{ kVA}$  - пълна мощността на синхронен двигател;

$Q_n = 7380 \text{ kVAr}$  - номинална реактивна мощност;

$\cos \varphi_n = 0,85$  - номинален фактор на мощността;

$x_d = 0,7$  - синхронно индуктивно съпротивление по надлъжната ос на двигателя;

$P_{сн} = 84,2 \text{ kW}$  - загуби в намотките на статора при номинален възбудителен ток  $I_{фн}$ ;

$P_{гн} = 86,5 \text{ kW}$  - загуба на мощност във възбудителната намотка при номинален режим на работа.

Резултатите от изчислението на коефициентите  $K_f$ ,  $\alpha'$ ,  $A$  и  $B$  са представени в Таблица 1

Таблица 1:

$\beta$	$K_f$ (6)	$\alpha'$ (7)	A [kW] (4)	B [kW] (5)
0,5	0,7	1,24	28,1	29,2
1,0	0,775	1	27,4	30
1,5	0,9	0,54	26,2	29

За определяне относителното нарастване на загубата на активна мощност при работа на синхронния двигател с товар  $\beta = 0,5; 1; 1,5$  се получават изразите:

$$\delta = \frac{2AQ}{Q_n^2} + \frac{B}{Q_n}$$

$$\delta_{0,5} = \frac{2,28,1}{7380} \cdot \frac{Q}{Q_n} + \frac{29,2}{7380} = 0,00776 \frac{Q}{Q_n} + 0,00396;$$

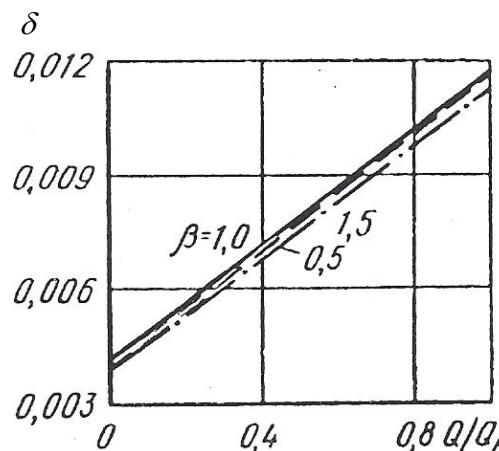
$$\delta_{1,0} = \frac{2,27,4}{7380} \cdot \frac{Q}{Q_n} + \frac{30}{7380} = 0,00762 \frac{Q}{Q_n} + 0,00406;$$

$$\delta_{1,5} = \frac{2,26,2}{7380} \cdot \frac{Q}{Q_n} + \frac{29}{7380} = 0,00738 \frac{Q}{Q_n} + 0,00394.$$

На фиг.1 са построени графическите зависимости  $\delta = f(Q/Q_n)$  за синхронен двигател с мощност  $S_n = 14000 \text{ kVA}$ ,  $U_n = 6 \text{ kV}$  при работа с различно натоварване  $\beta$  ( $\beta = 0,5; 1; 1,5$ ).

От получените зависимости  $\delta = f(Q/Q_n)$  за различни стойности на  $\beta$ , показани на фиг.1 следва, че в работния диапазон за изменение натоварването на двигателя, големината на  $\delta$  практически не зависи от натоварването.

Този извод е валиден за всички типове синхронни двигатели.



Фиг.1. Графическо представяне на зависимостта  $\delta = f(Q/Q_n)$  за синхронен двигател с мощност  $S_n = 14000 \text{ kVA}$ ,  $U_n = 6 \text{ kV}$  при работа с различно натоварване.

#### Приложение на метода за относителните нараствания за група синхронни двигатели.

Общата за компенсиране реактивна мощност на едно предприятие  $Q_k$  трябва да се раздели между два източника, относителното нарастване на които има линейна зависимост от реактивните товари и аналитично се записва по следния начин:

$$\delta_1 = d_1 Q_1,$$

$$\delta_2 = d_2 Q_2,$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_k.$$

Общите загуби на активна мощност  $P_p$  за производство на реактивна мощност  $Q_k$  се определят с израза:

$$P_p = \delta_1 Q_1 + \delta_2 Q_2 = d_1 Q_1^2 + d_2 Q_2^2 = d_1 Q_1^2 + d_2 (Q_k - Q_1)^2 = Q_k^2 (d_1 + d_2) + d_2 Q_k^2 - 2d_2 Q_k Q_1. \quad (8)$$

За определяне минималната стойност на загубите трябва да се получи първата производна на  $P_p$  по  $Q$ , по израза (8):

$$\frac{dP_p}{dQ} = 2Q_1 (d_1 + d_2) - 2d_2 Q_k = 0. \quad (9)$$

Втората производна на функцията  $P_p = f(Q)$ :

$$2(d_1 + d_2) > 0,$$

е показател, че тя действително има минимум.

От израза (9) се получават следните зависимости:

$$Q_1 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} Q_k,$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_k = \frac{d_1}{d_1 + d_2} Q_k,$$

$$\delta_1 = d_1 Q_1 = \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} Q_k,$$

$$\delta_2 = d_2 Q_2 = \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} Q_k,$$

от които следва, че:

$$\delta_1 = \delta_2,$$

т.е. минимум загуби на активна мощност се получава при изпълнение на условието: равенство на относителните нараствания на загубите на активна мощност на двата източника.

Полученият извод може да се разпространи и за произволен брой източници на реактивна мощност. Следователно, за група, състояща се от  $n$  синхронни двигатели, икономически най-изгодно разпределение на реактивното натоварване между тях се получава при изпълнение на условието за равенство на относителните нараствания на активните загуби на всичките  $n$  двигатели, т.е. ако:

$$Q_k = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i + \dots + Q_n,$$

то загубите  $P_p$  са минимални при изпълнението на условията

$$\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_i = \dots = \delta_n,$$

където:  $Q_1, Q_2, Q_i, Q_n, \delta_1, \delta_2, \delta_i, \delta_n$  - съответно частта на реактивна мощност и относителното нарастване на всеки един от  $n$ -те синхронни двигатели, участващи в компенсацията.

Всяко друго разпределение на общата реактивна мощност  $Q_k$  в предприятието ще води до увеличаване на активните загуби  $P_p$ .

**Сравнителна оценка на използвани методи за разпределение на реактивната мощност за компенсиране между група синхронни двигатели в експлоатация.**

На практика, при експлоатационни условия, най-често реактивната мощност на синхронните двигатели се разпределя пропорционално или на тяхната пълна мощност  $S_n$ , или на тяхната номинална реактивна мощност  $Q_n$ . С числен пример, ще се покаже как се изменят общите загуби на активна мощност  $P_p$  при разпределението на общата реактивна мощност между

група синхронни по един от следните методи: вариант I - разпределение, пропорционално на пълната мощност на двигателя; вариант II - разпределение, пропорционално на реактивната мощност на двигателя; вариант III - равенство на относителното нарастване на активните загуби на синхронните двигатели.

Реактивният товар на цехова подстанция на шини  $6kV$  е  $Q_k = 20000kVar$  и трябва да се разпредели между три синхронни двигателя с технически данни приведени в Таблица 2.

Таблица 2

Параметър на синхронните двигатели	Двигател №1	Двигател №2	Двигател №3
1.Пълна мощност, $S_n, kVA$	$S_{n1} = 17000$	$S_{n2} = 14000$	$S_{n3} = 13300$
2.Реактивна мощност, $Q_n, kVar$	$Q_{n1} = 10200$	$Q_{n2} = 7380$	$Q_{n3} = 7980$
3. Коэффициент А	$A_1 = 49,6$	$A_2 = 27,4$	$A_3 = 43,8$
4. Коэффициент В	$B_1 = 35,8$	$B_2 = 30,0$	$B_3 = 31,3$

Разпределението на зададения реактивен товар за компенсиране ще се изпълни по следните три варианта:

1. Разпределение на зададения реактивен товар за компенсиране пропорционално на пълната мощност  $S_n$  на синхронните двигатели;
2. Разпределение на зададения реактивен товар за компенсиране пропорционално на реактивната мощност  $Q_n$  на синхронните двигатели;
3. Разпределение на зададения реактивен товар за компенсиране по метода на относителното нарастване на загубите на реактивна мощност.

#### Вариант I:

1. Определяне на реактивния товар на всеки синхронен двигател по формулата:

$$Q_i = \frac{Q_k S_{ni}}{S_{n1} + S_{n2} + S_{n3}} ; i = 1,2,3 ;$$

2. Определяне на загубите на активна мощност в синхронните двигатели по израза:

$$P_{pi} = \frac{A_i Q_i^2}{Q_{ni}^2} + \frac{B_i Q_i}{Q_{ni}} ; i = 1,2,3 ;$$

3. Определяне на сумарните загуби на активна мощност в синхронните двигатели по израза:

$$\Sigma P_p = 55,3 + 46,0 + 48,3 = 149,6 \text{ kW} .$$

#### Вариант II:

1. Определяне реактивния товар за всеки двигател по формулата:

$$Q_i = \frac{Q_k Q_{ni}}{Q_{n1} + Q_{n2} + Q_{n3}} ; i = 1,2,3 ;$$

2. Определяне загубите на активна мощност в синхронните двигатели по израза:

$$P_{pi} = \frac{A_i \cdot Q_i^2}{Q_{ni}^2} + \frac{B_i \cdot Q_i}{Q_{ni}} = 58,6 \text{ kW} ; i = 1, 2, 3 ;$$

3. Определяне на сумарните активни загуби в синхронните двигатели по израза:

$$\Sigma P_p = 58,6 + 40,3 + 51,4 = 150,3 \text{ kW} .$$

#### Вариант III:

1. За определяне на реактивното натоварване на всеки синхронен двигател се съставя следната система уравнения:

$$Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 ;$$

$$\delta_1 = \frac{2A_1 \cdot Q_1}{Q_{H1}^2} + \frac{B_1}{Q_{H1}} ; \delta_2 = \frac{2A_2 \cdot Q_2}{Q_{H2}^2} + \frac{B_2}{Q_{H2}} ;$$

$$\delta_3 = \frac{2A_3 \cdot Q_3}{Q_{H3}^2} + \frac{B_3}{Q_{H3}} .$$

2. От решаване на получената система се получават следните стойности за реактивното натоварване на всеки синхронен двигател:

$$Q_1 = \frac{Q_k \left[ \frac{\left( \frac{B_1}{Q_{H1}} - \frac{B_2}{Q_{H2}} \right) Q_{H2}^2 + \left( \frac{B_1}{Q_{H1}} - \frac{B_3}{Q_{H3}} \right) Q_{H3}^2}{2A_2} + \frac{\left( \frac{B_1}{Q_{H1}} - \frac{B_3}{Q_{H3}} \right) Q_{H3}^2}{2A_3} \right]}{1 + \frac{A_1 Q_{H2}^2}{A_2 Q_{H1}^2} + \frac{A_1 Q_{H3}^2}{A_3 Q_{H1}^2}}$$

$$Q_2 = \frac{\left( \frac{2A_1 Q_1}{Q_{H1}^2} + \frac{B_1}{Q_{H1}} - \frac{B_2}{Q_{H2}} \right) Q_{H2}^2}{2A_2}$$

$$Q_3 = \frac{\left( \frac{2A_1 Q_1}{Q_{H1}^2} + \frac{B_1}{Q_{H1}} - \frac{B_3}{Q_{H3}} \right) Q_{H3}^2}{2A_3}$$

3. Определяне загубите на активна мощност в синхронните двигатели:

$$P_{pi} = \frac{A_i \cdot Q_i^2}{Q_{ni}^2} + \frac{B_i \cdot Q_i}{Q_{ni}} ; i = 1, 2, 3 ;$$

4. Определяне на сумарните загуби на активна мощност в синхронните двигатели:

$$\Sigma P_p = 57,0 + 52,2 + 38,9 = 148,1 \text{ kW} .$$

Числените стойности за реактивното натоварване на всеки синхронен двигател и на активните загуби в него за трите варианта са представени в Таблица 3 и Таблица 4.

Таблица 3:

метод		Пълна мощност на синхронен двигател			Общи загуби на мощност
		S <sub>H1</sub>	S <sub>H2</sub>	S <sub>H3</sub>	
Вариант I	Реактивен товар на синхронен двигател Q [kVAr]	7680	6320	6000	20000
	Загуби на активна мощност в синхронен двигател P <sub>p</sub> [kW]	55,3	46,0	48,3	149,6
Вариант II	Реактивен товар на синхронен двигател Q [kVAr]	7980	5760	6250	20000
	Загуби на активна мощност в синхронен двигател P <sub>p</sub> [kW]	58,6	40,3	51,4	150,3
Вариант III	Реактивен товар на синхронен двигател Q [kVAr]	7880	6920	5200	20000
	Загуби на активна мощност в синхронен двигател P <sub>p</sub> [kW]	57,0	52,2	38,9	148,1

Таблица 4:

Показател	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Сумарни загуби на мощност в синхронните двигатели, kW	149,6	150,3	148,10

Получените резултати, представени в Таблица 4, потвърждават, че разпределението на реактивните товари на основата за равенство на относителното нарастване на загубите на реактивна мощност дава минимална стойност на загубите на активна мощност, зависещи от реактивната.

В най-общият случай при икономично разпределение на реактивното натоварване между *n* броя синхронни двигатели по метода на относителното нарастване загубите на активна мощност се получава следната система уравнения:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_k &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots \dots \dots Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i ; \\
 \delta_1 &= \frac{2A_1 Q_1}{Q_{H1}^2} + \frac{B_1}{Q_{H1}} ; \\
 \delta_2 &= \frac{2A_2 Q_2}{Q_{H2}^2} + \frac{B_2}{Q_{H2}} ; \delta_3 = \frac{2A_3 Q_3}{Q_{H3}^2} + \frac{B_3}{Q_{H3}} ; \\
 &\dots \dots \dots \\
 \delta_n &= \frac{2A_n Q_n}{Q_{Hn}^2} + \frac{B_n}{Q_{Hn}} ,
 \end{aligned} \right\} (10)$$

където

$Q_i$  - част от реактивното натоварване, което се пада на  $i$ -я синхронен двигател.

От решаването на системата (10) спрямо  $Q_i$  се получава следния израз:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{Q_k - \left( \frac{b_1 - b_2}{a_2} + \frac{b_1 - b_3}{a_3} + \dots \dots \dots + \frac{b_1 - b_n}{a_n} \right)}{1 + \frac{a_1}{a_2} + \frac{a_1}{a_3} + \dots \dots \dots + \frac{a_1}{a_n}} ; \\
 Q_2 &= \frac{a_1 Q_1 + b_1 - b_2}{a_2} ; Q_3 = \frac{a_1 Q_1 + b_1 - b_3}{a_3} ; \\
 &\dots \dots \dots \\
 Q_n &= \frac{a_1 Q_1 + b_1 - b_n}{a_n} ,
 \end{aligned} \right\} (11)$$

където

$$a_i = \frac{2A_i}{Q_{Hi}^2} ; \quad b_i = \frac{B_i}{Q_{Hi}} .$$

Препоръчана за публикуване от катедра „Електрификация на минното производство“, МЕМФ

Предаването на генерираната от синхронните двигатели реактивна мощност е свързано с определени активни загуби в захранващия двигателя фидер. Тези загуби са пропорционални на квадрата на пренасяната реактивна мощност, т.е.:

$$P_{р.к} = \frac{Q_i^2 r_{\phi i}}{U_H^2} , \quad (12)$$

а относителното нарастване на загубите се определя по израз (2):

$$\delta_{\phi} = \frac{2Q_i r_{\phi i}}{U_H^2} , \quad (13)$$

където  $r_{\phi}$  - активното съпротивление на фидера.

Сумарното относително нарастване на  $i$ -я синхронен двигател ще се определя по израза:

$$\delta_x = \frac{2A_i Q_i}{Q_{Hi}^2} + \frac{B}{Q_{Hi}} + \frac{2r_{\phi i} Q_i}{U_H^2} = c_i Q_i + b_i , \quad (14)$$

където

$$c_i = 2 \left( \frac{A_i}{Q_{Hi}^2} + \frac{r_{\phi i}}{U_H^2} \right) \quad (15)$$

За определянето на най-икономичния режим за разпределение на реактивното натоварване е възможно да се използва израза (11), заменяйки  $a_i$  с  $c_i$ .

## Литература

1. Кърцелин Е., Минеков Н., Повишаване енергийната ефективност на промишлени предприятия. Оптимизация възбуждането на група мощни синхронни двигатели, С., изд. къща „Св. Ив. Рилски“, 2010.
2. Петелин Д.М., Динамика синхронного привода пршневых компресорных установок, М., Машиностр., 1976.
3. Данаилов Д., Оптимално използване на електроенергията в минните предприятия, С., Техника, 1985.