

## КОМПЕНСИРАНЕ И СИМЕТРИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТОВАРИ НА ИНДУКЦИОННИ ТИГЕЛНИ ПЕЩИ

**Велизар Багаров, Ивайло Вълев**

*Минно-геоложки университет "Св.Иван Рилски", 1700 София*

**РЕЗЮМЕ:** Едни от най-мощните промишлени еднофазни потребители, работещи на линейно напрежение са индукционните тигелни пещи. Монтираните в нашите чугунолеярни предприятия пещи ИЧТ 10/2.5, в някои режими потребяват до 1800 kW при фактор на мощността около 0.2. Пещите се захранват от трифазни пещни трансформатори по схемата на Щайнметц.

В доклада е формулирана и решена оптимизационна задача за постигане на оптимално симетриране на електрическите товари при различни режими и електротехнически ограничения. Задачата е решена за конкретна пещ с помощта на MATLAB.

### COMPENSATING AND BALANCING OF THE ELECTRIC CHARGES OF AN INDUCTION CRUCIBLE FURNACES

**Velizar Bagarov, Ivailo Valev**

*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"*

**ABSTRACT.** One of the most powerful industrial two-phase consumers are the induction crucible furnaces. In the Bulgarian's iron-foundry industry furnaces mounted are type ИЧТ 10/2,5 Their power demands attainment 1800 kW in some regimes at power's factor about 0.2. The supply of the furnaces coming of a three-phase special transformer, on Shtainmetz's circuitry. In the report is formulated and completed objective function, connected to achievement of minimal supply voltage unbalance at different regimes and technical constrains. The problem is completed to particular cupola with help of the MATLAB.

Индукционните тигелни пещи с капацитет по-голям от 2 тона и мощност повече от 1000kW се захранват от трифазни понижавачи трансформатори с регулируемо под товар напрежение на вторичната намотка. Еднофазният индуктор се захранва на линейно напрежение. За обезпечаване на равномерно натоварване на трите фази, във веригата на вторичната намотка на трансформатора се включва симетриращо устройство състоящо се от реактор и регулируем кондензатор, свързани с индуктора в триъгълник (схема на Щейнметц) (Минеев и др., 1986).

Компенсирането на реактивната мощност на индуктора е задължително, поради ниския естествен фактор на мощността. Кондензаторната батерия  $C_{сим}$  и индуктивността (реактора  $L_{сим}$ ) служат като симетриращ товар за намаляване на несиметрията в захранващата мрежа. Кондензаторната батерия  $C_{сим}$  е с управляема мощност, тъй като консумираната от мрежата активна мощност е силно променлива през време на процеса на топене (фиг №1). Това налага и симетриращата мощност да се изменя по сходен график. Още по-голямо удобство би създадо използването на индуктивност, която дава възможност за регулиране. Този тип реактори обаче са скъпи, капризни при работа и рядко се използват в подобни схеми.

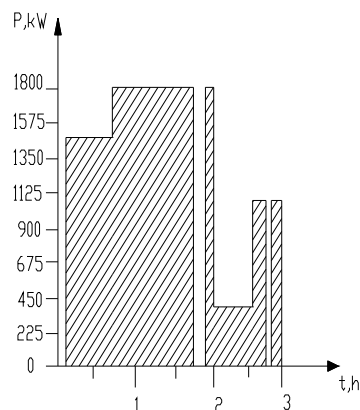
Сред преимуществата на схемата на Щайнметц са нейната простота и доказана успешна дългогодишна работа. Елементите в схемата, макар и от специален клас – електропещни, са в серийно производство, което значително снижава цената им.

Един от главните недостатъци на схемата на Щайнметц е трудното автоматизиране на управлението на процеса. Трудностите се пораждат най-вече от тежките преходни процеси свързани с работата в схемата на

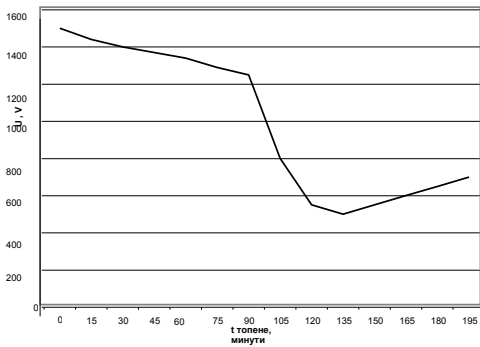
елементи с изцяло индуктивен или капацитивен характер. Персоналът обслужващ индукционните пещи е принуден да прави ръчни корекции в заданията, без да има предварително изведен алгоритъм за това.

Извеждането на подобен алгоритъм за ръчно управление на процеса, в който да са определени оптималните мощности (капацитети) на кондензаторните батерии за симетриране и компенсиране (управляемите параметри в схемата) едва ли би решило напълно проблемите с електрозахранването на индукционните пещи, но би било в помощ на обслужващия персонал.

Основни проблеми при електроснабдяване на индукционни пещи са изразено ниския им естествен фактор на мощността и несиметричността им като товар в мрежата. Освен това в процеса на работа се променя захранващото напрежение, което от своя страна силно влияе на мощността на кондензаторните батерии.



Фиг.1 Товаров график на пещ ИЧТ 10



Фиг.2 Промяна на захранващото напрежение

От товарния график на индукционната печ ИТЧ-10 (фиг.1), и графика на захранващото напрежение (фиг.2) могат да се направят следните основни изводи:

1. Консумираното от захранващата мрежа количество активна електрическа енергия е изразено неравномерно през времетраенето на процеса. Същото важи и за големината на захранващото напрежение.

2. Графикът може да бъде разделен условно на три отделни части – първи етап (разтопяване на късовете метал поставени в тигела), следва нулева консумация на ел. енергия (вземане на проба от метала), втори етап (рафиниране на метала), отново нулева консумация на ел. енергия (вземане на проба от метала след рафинирането), трети етап (подгръване и изливане на метала от тигела).

Най-голямата консумация на ел. енергия е през първия етап на работа (около 70÷75%). През този етап на работа захранващото напрежение се променя сравнително слабо (варира в диапазона 1500-1300 волта). Това създава благоприятна възможност за изпълнение на задачата по компенсиране и симетриране на товара.

Основни проблеми при симетрирането на товара са:

\* промяната на захранващото напрежение. В процеса на работа захранващото напрежение намалява от 1500 волта до 500 волта. Това води до намаляване на мощността отделяна от кондензаторните батерии около 9 пъти.

\* непрекъснато протичащи преходни процеси – с намаляване на захранващото напрежение се налага включването на нови кондензаторни батерии, което веднага води до протичане на тежки преходни процеси.

\* при ръчно управление на процеса е необходимо за всеки етап да се изчисли необходимата оптимална кондензаторна мощност за симетриране и компенсиране, като в същото време се гарантира устойчивата работа на електропещния трансформатор. Особено внимание трябва да се обърне на първия етап от топлиния процес, които се характеризира с най-големи мощности и най-голяма продължителност.

\* при последните два етапа – вземане на повторна проба от стопилката и изливане на метала от тигела е характерна кратковременността на етапите при сравнително високата мощност - 1116kW и малко количество консумирана електроенергия. Тези параметри са комбинирани с най-ниското ниво на захранващото напрежение през време на целия процес. Напрежението се променя в диапазона 500 – 600 V. Това води до включване на кондензаторни батерии с много голяма мощност, които

ще останат неизползвани през останалите етапи на процеса.

За да се направи опит за извеждане на модел за оптимизиране на електрозахранването на сложен промишлен агрегат, какъвто представлява сама по себе си една индукционна печ, е необходимо да се разгледат в детайли всички елементи от електрозахранването на печта, да се изчислят загубите на активна електроенергия в отделните елементи на системата за електрозахранване, да се анализират причините за тези загуби и възможностите за ограничаването им. Необходимо е на първо място да се изчислят необходимите кондензаторни капацитети и съответно мощности за симетрична работа и в същото време гарантиращи компенсиране на индуктивната мощност на индуктора на печта.

От характера на товарите включени на различните линейни напрежения, могат да се направят следните изводи и опростявания с цел да се облекчи задачата за оптимизация:

1. Токът протичащ през индуктора на товара има както активна, така и реактивна съставни, поради голямата си индуктивност (естествен фактор на мощността – 0,2) и включените в схемата кондензаторни батерии за компенсиране.

2. Може да се пренебрегнат активните съпротивления в клоновете на  $C_{сим}$  и  $L_{сим}$ , като там токовете могат да се приемат за изцяло реактивни – капацитивен ток изпреварващ съответното напрежение и индуктивен, изоставащ от съответното напрежение.

3. За да се намерят оптималните параметри за работа на схемата на електрозахранване на печта е необходимо да бъде намерен показател за симетриране на товарите. Много удачен за тази цел показател са загубите на енергия в активното съпротивление на трансформаторните намотки. Тези загуби са пропорционални на средноквадратичната сума на трите фазни тока. Сумата на трите фазни тока е постоянна – тя винаги е нула. Известно е, че средноквадратичната сума на няколко променливи, чиято сума е константа, е най-малка когато променливите са равни помежду си. Следователно може да се направи извода, че загубите на енергия в активното съпротивление на трансформаторните намотки ще бъдат най-малки при пълна симетрия на трите фазни тока.

4. При изчисляване на оптималните параметри задължително трябва да се вземат под внимание три ограничителни условия:

- Номиналната мощност на пещния трансформатор
- Общия капацитет на кондензаторните батерии с които е окомплектована индукционната печ
- Фактора на мощност който е предписан от електроразпределителното предприятие – доставчик на електрическа енергия.

Линейните токове през елементите в схемата на Щайнметц са определени със следните формули (прието е, че напрежението между фази А и В съвпада с положителната посока на имагенерната ос):

$$I_{ab} = -U\omega C_{сим} + j*0$$

$$\varphi(U_{AB} \wedge I_{AB}) = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$I_{bc} = \frac{U}{\omega L_{CUM}} \cos(\pi + \frac{\pi}{3}) + j \frac{U}{\omega L_{CUM}} \sin(\pi + \frac{\pi}{3}) =$$

$$= -0.5 \frac{U}{\omega L_{CUM}} - j * 0.866 \frac{U}{\omega L_{CUM}} \quad (2)$$

$$\varphi(U_{BC} \wedge I_{BC}) = \frac{\pi}{2}$$

$$I_{ca} = \frac{P}{U} \cos(\pi + \frac{\pi}{6}) + j \frac{P}{U} \sin(\pi + \frac{\pi}{6}) +$$

$$\frac{P \sin(\varphi)}{U} \cos(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2}) + j * \frac{P \sin(\varphi)}{U} \sin(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2}) +$$

$$+ U \omega C_{ком} \cos(2\pi - \frac{\pi}{3}) + j * U \omega C_{ком} \sin(2\pi - \frac{\pi}{3}) =$$

$$= -0.866 \frac{P}{U} - 0.5 * \frac{P \sin(\varphi)}{U} + 0.5 U \omega C_{ком} -$$

$$j * 0.5 * \frac{P}{U} + j * 0.866 * \frac{P \sin(\varphi)}{U} -$$

$$- j * 0.866 * U \omega C_{ком}; \dots \dots \dots (3)$$

Трите фазни тока ,като комплексни величини имат вида:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} \quad (4)$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} \quad (5)$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} \quad (6)$$

Тъй като при симетрична работа на пеща загубите в активното съпротивление на трансформатора ще бъдат минимални, целевата функция ще има вида:

$$(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) r_T \rightarrow \min \quad (7)$$

където  $r_T$  е активното съпротивление на пещния трансформатор.

За намиране на загубите на активна енергия в съпротивлението на трансформаторните намотки е достатъчно да знаем модулите на токовете протичащи през тези намотки, т.е. само големината на векторите. Във целевата функция квадратите на токовете са заместени със сумата от квадратите на техните реални и имагенерни части. Към така формулираната целева функция са добавени и споменатите по-горе ограничителни условия.

За минимизиране на функцията са използвани методите на квадратичното програмиране. Като помощно средство е използван програмен продукт MATLAB 7.1.

В таблица 1 са дадени изчислените оптимални стойности за капацитетите на симетриращите и компенсиращите кондензатори при трите режима.

Таблица 1. Оптимални стойности

Режим на работа	Симетриращи кондензаторн и батерии, mF	Компенсиращи кондензаторни батерии, mF
Начален	1,3	10,2
Основен	1,7	15,6
Краен	1,7	15,0

От таблица №1 е видно че при трите режима на работа на пеща се използва в различна степен капацитета на инсталираните кондензаторни батерии.. Като цяло най-малка е използваемостта на батериите в началния режим на работа, когато захранващото напрежение е най-високо. В другите два режима макар и да са коренно различни по между си, използваемостта на батериите е почти еднаква. Това е възможно благодарение на значителното снижаване на консумираната активна мощност по време на крайния режим, съпътствано от понижаване на захранващото напрежение. За да се получат минимални загуби, системата сама се стреми към максимално висок фактор на мощността. Видно е ,че и при трите режима компенсиращите кондензаторни батерии достигат най-високата стойност, която им позволява ограничителното условие по максимално ниво на компенсиране ( при трите режима  $\cos\varphi = 1$ ). В таблица 2 е дадена получената несиметрия на токовете при оптималното решение.

Таблица №2

Режи м	Ia, %	Ib, %	Ic, %	Средно кв.
Нач ален	3 %	12 %	9 %	8,81%
Основен	12%	19 %	7 %	13,76%
Краен	3%	8 %	5%	5,88%

За всеки ток е посочена несиметрията спрямо средноаритметичния на трите тока. В последната колонка е показана средноквадратичната сума на несиметриите на трите тока за дадения режим.

Най-удачно е разделянето на кондензаторната батерия за симетриране на три степени, със стойности съответно 1, 0,3 и 0,4 mF. През началния режим на работа работят първите две, а през основния и довършителния режим на работа се включва и третата.

При кондензаторната батерия за компенсиране се налага разделяне на четири степени със стойности съответно 10, 5 ,0,4 и 0,2 mF, за да се осигури необходимия капацитет при трите режима на работа. През началния режим на работа работят едновременно 10 и 0,2 mF, през основния – всички степени и през крайния 10 и 5 mF.

### Литература

1. Минеев Р., А.Михеев, Ю.Рыжнев. 1986. Повышение эффективности электроснабжения электропечей. М.,Энергоатомиздат201 с.
2. А.Д.Свенчански и др.,1982.Электро – технологические промышленные установки,М.,Энергоиздат 392 с.