

FRI-216-1-NMTS(S)-07

COMPENSATION OF REACTIVE POWER OF A HIGH-POWER INDUCTION FURNACE¹⁰⁸

Assist. Svetlozar Grigorov, M.Sc.Eng. – PhD Student

Department of Philological and Natural Sciences, Silistra Branch,
University of Ruse “Angel Kanchev”

E-mail: sgrigorov@uni-ruse.bg

Abstract: *The values of the reactive power of a high-power induction furnace are measured and recorded by a three-phase power quality analyser. The results are presented and analysed. It is found that to improve power quality, a reactive power compensation unit is needed and it is designed. The application possibilities of the compensation unit are analyzed.*

Keywords: *High-Power Induction Furnace, Power Quality, Reactive Power, Compensation, Design*

JEL Codes: *L61, L94*

ВЪВЕДЕНИЕ

Изследвани са различни показатели на качеството на електрическата енергия, при работа на мощна индукционна пещ. Анализирани са несинусоидалните изкривявания на тока и напрежението в захранващата схема, като е установено, че измененията на тока са много по-големи (Grigorov, Sv., & K. Koev, 2022). За същата индукционна пещ са изследвани и анализирани измененията на активната, реактивната и пълната мощности и на фактора на мощността (Grigorov, Sv., & K. Koev, 2023). Установено е, че неговата стойност се изменя в процеса на работа на пещта и не винаги отговаря на изискванията. Възможно решение за подобряване на фактора на мощността е чрез използване на уредби за компенсиране на реактивната мощност (Baggini, A., 2008, Gönen, T., 2014).

Целта на доклада е да се проектира подходящо устройство за компенсиране реактивната мощност на пещта.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Обект на изследване

Обектът, чиято реактивна мощност ще се компенсира, е електрическа индукционна пещ с мощност 800 kW. Тя е от тигелен тип с максимална маса на материала за топене 1600 kg. Пещта се захранва с трифазно променливо напрежение с ефективна стойност 380 V от самостоятелен трансформатор. Честотата на напрежението в мрежата се повишава от 50 Hz до 1 kHz чрез електронен преобразувател, за да се регулира напрежението и да се управлява работния режим.

Методи и средства за изследването

Измененията на мощностите и фактора на мощността се изследват в реални работни условия чрез анализатор на електрическа енергия Metrel Master Q4 MI 2885 (Metrel 2021). Уредът се свързва по трифазна, 4-проводна схема, към изводите за ниско напрежение на трансформатора, захранващ пещта. Номиналната стойност на напрежението е $U_N = 230$ V, а на честотата $f_N = 50$ Hz.

¹⁰⁸ Докладът е представен пред секция “Природоматематически и технически науки” на 63-тата научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев“ и Съюза на учените-Русе на 18 октомври 2024 година с оригинално заглавие на български език: КОМПЕНСИРАНЕ НА РЕАКТИВНАТА МОЩНОСТ НА МОЩНА ИНДУКЦИОННА ПЕЩ

Реактивна мощност и необходимост от компенсирането ѝ

Известно е (Gönen, T., 2014, Stefanov, St., & V. Ruseva, 2010), че в електрическите вериги за променливо напрежение само част от електрическата енергия, доставяна от захранващата мрежа на консуматорите, се използва ефективно от тях за преобразуване в друг вид енергия. Причината е, че голяма част от консуматорите (електрически машини, трансформатори, дросели, индукционни и електродъгови пещи и др.) функционират, като използват променливо електромагнитно поле. Неговото получаване е свързано с дефазиране на векторите на тока и напрежението в електрическите вериги. По тази причина явленията и процесите лесно могат да бъдат представени и анализирани чрез векторна диаграма на основните величини (Фиг. 1).

Моментните стойности на променливи синусоидални напрежение u и ток i в електрическа верига с активно-индуктивен характер на товара се дават с изразите

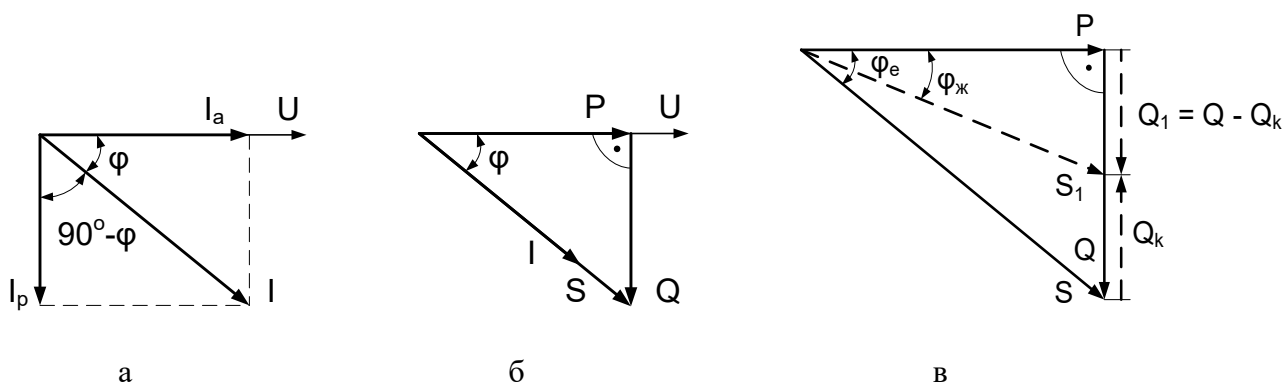
$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

където U и I са ефективните стойности на напрежението и тока, V, A;

ω - ъгловата скорост на въртене на векторите на тока и напрежението, rad/s;

φ - ъгълът на дефазиране на векторите на тока и напрежението, rad.



Фиг. 1. Векторни диаграми: а – на тока (I) и напрежението (U); б - на тока (I), напрежението (U), активната (P), реактивната (Q) и пълната (S) мощности; в - за определяне големината на компенсиращата реактивна мощност (Q_k)

Представените векторни диаграми (Фиг. 1) се отнасят за електрическа верига с активно-индуктивен характер на товара, защото векторите на тока I и на пълната мощност S изостават на ъгъл φ от векторите на напрежението U и на активната мощност P . Моментната стойност на пълната мощност s на клемите на консуматора, към които се подава захранващото напрежение, е

$$s = u \cdot i = 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi). \quad (3)$$

Първото събираемо $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ представлява активната мощност P , W, а второто събираемо $U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi)$ е реактивната мощност Q , VAr. Активната мощност характеризира преобразуването на електрическата енергия в друг вид енергия от консуматорите. Реактивната мощност характеризира електрическата енергия, която се преобразува в електромагнитно поле.

Алгебричните стойности на различните величини от векторните диаграми и техните количествени съотношения (Фиг. 1б) се представят чрез Питагоровата теорема за правоъгълен триъгълник и тригонометрични функции (Baggini, A., 2008, Gönen, T., 2014):

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad \cos\varphi = P/S, \quad \operatorname{tg}\varphi = Q/P, \quad P = S \cdot \cos\varphi, \quad Q = S \cdot \sin\varphi \quad (4)$$

Тригонометричната функция $\cos \varphi$ се нарича фактор на мощността и стойността му не трябва да бъде по-малка от 0,9 (Gönen, T., 2014, Stefanov, St., & V. Ruseva, 2010).

Реактивната енергия циркулира само между хранящия източник и елементите на електрическите вериги, които използват електромагнитно поле (капацитети и индуктивности). Ако стойността на $\cos \varphi$ е по-ниска, при постоянна активна мощност на консуматорите, до тях трябва да се достави по-голямо количество реактивна енергия. Това означава, че ще протича по-голям ток във веригите. Последиците са: допълнителни загуби на напрежение, на активна мощност и енергия, намаляват пропускателната способност на елементите и техния коефициент на полезно действие (к. п. д.). Ограничаването на загубите (т.е. намаляване на реактивната мощност) позволява ефективното използване на електрическата енергия, без да се претоварват съоръженията и др.

Намаляването на реактивната мощност, доставяна от хранящия източник и консумирана от единични консуматори, като индукционните пещи, се реализира чрез включване на т. нар. реактивни компенсиращи устройства. Те трябва да имат противоположен характер на този на консуматора – в случая, поради предимствата си, се използват кондензатори. Те създават реактивна енергия, която се консумира от индуктора на пещта и не се налага тази реактивна енергия да се доставя от хранящия източник, като протича през елементите на веригите.

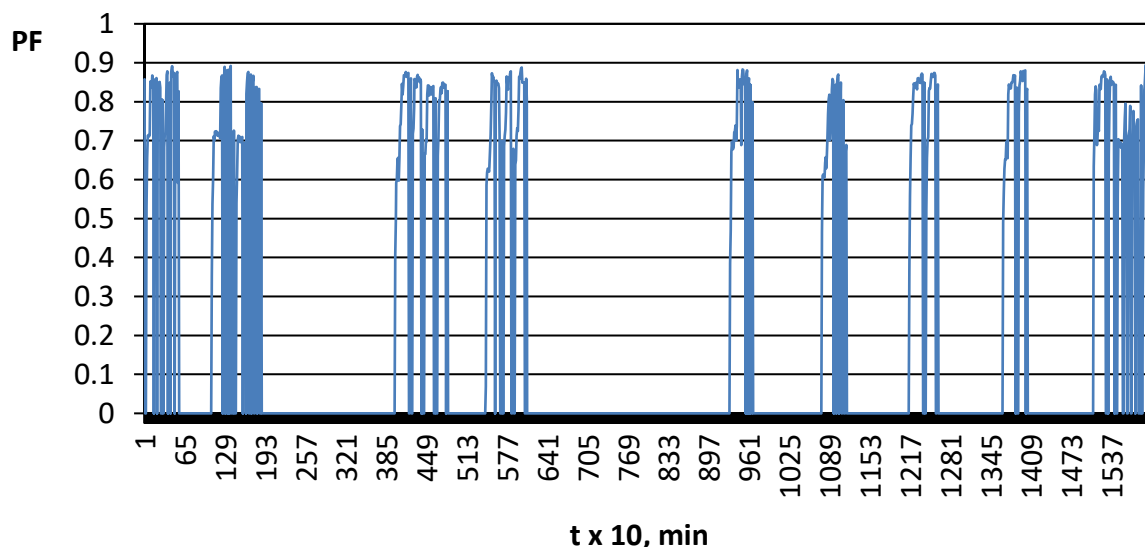
Проектиране на компенсиращо устройство

Критерият, който се използва за проектиране на компенсиращите устройства, е стойността на фактора на мощността на консуматорите да бъде $\cos \varphi \geq 0,9$, т.е. това е т. нар. желана стойност $\cos \varphi_{\text{ж}}$. В различните електрически уредби, в които не се използват компенсиращи устройства, консуматорите, в общия случай, се характеризират с $\cos \varphi < 0,9$. Тази стойност е „естествена“ – $\cos \varphi_{\text{е}}$. На Фиг. 1в ясно се виждат разликите във вектора на реактивната мощност – Q без компенсация и Q_1 с компенсация, при двата варианта на ъгъла на дефазирание φ между векторите на активната мощност P и на пълната S и S_1 .

Дължината на вектора на реактивната мощност Q намалява с дължината на вектора на компенсиращата мощност Q_k (противоположен по посока на вектора Q) до нова стойност Q_1 . Тя се определя с по-малката стойност на ъгъла $\varphi_{\text{ж}}$ и, съответно, с по-голяма стойност на $\cos \varphi_{\text{ж}}$. Най-често се използват моментната стойност на фактора на мощността (4), а също и средната стойност за период от време (средно претеглена) $\cos \varphi_{\text{с}}$.

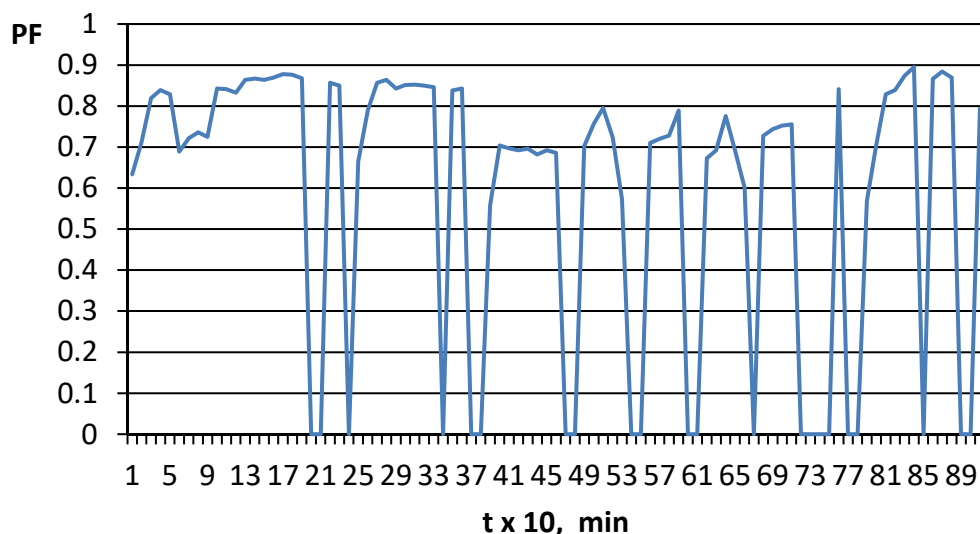
Използваният анализатор на електрическа енергия позволява да се измерват много величини в електрическите вериги, включително фактора на мощността $\cos \varphi$. Неговите стойности се измерват отделно за всяка фаза и общо за трите фази – за основния хармоник, за останалите хармоници и общо за всички хармоници, включително основния. Наличието на хармоници се дължи на нелинейния електронен преобразувател, който хранва индукционната пещ с напрежение с честота 1 kHz (Grigorov, Sv., & K. Koev, 2022). Коректен анализ на фактора на мощността, при наличие на хармоници, може да се проведе, ако се използва общата стойност на този показател.

На Фиг. 2 са показани измененията на общия фактор на мощността (PF), общо за трите фази, за 9 работни дни. Характерно е, че за голяма част от представените работни периоди, стойностите са по-малки от 0,9 и по-големи от 0,8. Забелязват се и интервали, в които стойността на (PF) е в интервала (0,6...0,7).



Фиг. 2. Изменение на общия фактор на мощността (PF)

Измененията на фактора на мощността (PF) за последния работен период (9-я работен ден) от Фиг. 2 са показани по-детайлно на Фиг. 3, общо за трите фази. Стойностите са записани в продължение на две последователни работни смени с обща продължителност 15 h.

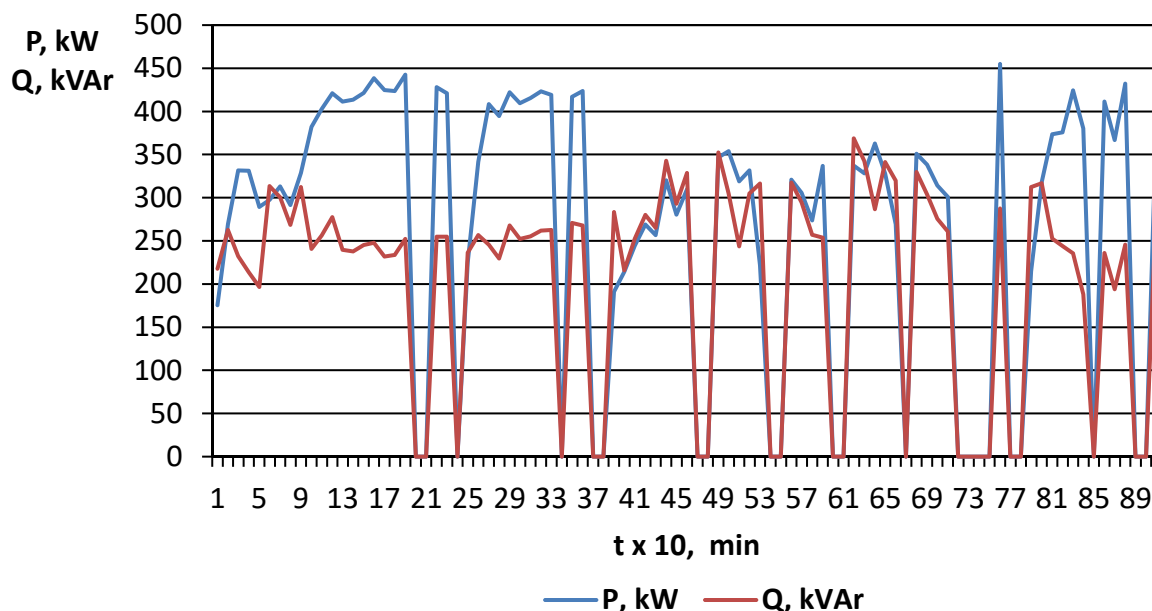


Фиг. 3. Изменение на общия фактор на мощността (PF) за един работен ден

Забелязва се, че през по-голяма част от разглеждания работен период, стойността на (PF) е в интервала (0,7...0,8). Регистрирани са и стойности извън този интервал, но не по-големи от 0,9. Измененията на стойностите се дължат на променливия характер на работния режим на пещта.

Измененията на активната (P) и реактивната (Q) мощности, общо за трите фази, за същия работен ден (две последователни работни смени с обща продължителност 15 h), са представени на Фиг. 4. Графиките представят неравномерни изменения на величините. В периодите с по-малко натоварване на пещта (390...710) min, стойностите на активната (P) и реактивната (Q) мощности са почти еднакви или с малки разлики. Тези периоди съответстват на $PF = (0,7...0,8)$ (Фиг. 3). В останалите работни периоди се забелязва, че активната мощност (P) е значително по-голяма от реактивната мощност (Q) – (110...370) min и

(760...900) min. Тези изменения съответстват на стойностите на общия фактор на мощността $PF = (0,8...0,9)$ (Фиг. 3).



Фиг. 4. Изменения на активната (P) и реактивната (Q) мощности за един работен ден

Представените на (Фиг. 2), (Фиг. 3) и (Фиг. 4) изменения на величините потвърждават и други изследвания за необходимостта от проектиране на компенсиращо устройство (Grigorov, Sv., & К. Коев, 2023).

Анализирани са данните за консумираните от пещта активна W и реактивна V електрическа енергии за първите 9 месеца на 2024 г. Установено е, че месец юли се характеризира с най-големи стойности – $W = 66\,996\text{ kWh}$ и $V = 53\,731\text{ kVArh}$. Тези резултати са много близки до максималните за 4-годишен период на работа на пещта. По тази причина проектирането на компенсиращото устройство е извършено по данните за месец юли, 2024 г. Използва се средно претеглената стойност на фактора на мощността $\cos \varphi_c$ за общия брой работни часове за разглеждания месец. Анализът на работните периоди на пещта за месец юли, 2024 г. показват, че общият брой работни часове е $T = 176\text{ h}$. Средните стойности на активната мощност P_c и на $\text{tg } \varphi_c$, за месеца, са

$$P_c = W / T = 66\,996 / 176 = 380,7\text{ kW}, \quad \text{tg } \varphi_c = V / W = 53\,731 / 66\,996 = 0,802 \quad (5)$$

Стойността на тригонометричната функция tg за естествения фактор на мощността $\cos \varphi_c$ съвпада с изчислената $\text{tg } \varphi_c$, т.е. $\text{tg } \varphi_c \equiv \text{tg } \varphi_c$. Факторът на мощността $\cos \varphi_c$, с отчитане на всички хармонични съставки, се определя по формулата

$$\cos \varphi_c = \cos (\arctg (\text{tg } \varphi_c)) = \cos (\arctg (0,802)) = \cos (38,73^\circ) = 0,780 \quad (6)$$

Стойността на желания фактор на мощността е приета минималната възможна $\cos \varphi_{\text{ж}} = 0,9$, а стойността на тригонометричната функция $\text{tg } \varphi_{\text{ж}}$ е

$$\text{tg } \varphi_{\text{ж}} = \text{tg} (\arccos \varphi_{\text{ж}}) = \text{tg} (\arccos 0,9) = \text{tg} (25,84^\circ) = 0,484 \quad (7)$$

Тогава необходимата реактивна мощност на кондензаторната батерия е

$$Q_{kc} = k \cdot P_c \cdot (\operatorname{tg} \phi_{ec} - \operatorname{tg} \phi_{ж}) = 1,15 \cdot 380,7 \cdot (0,802 - 0,484) = 139,22 \text{ kVAr} \quad (8)$$

Стойността на коефициента k е в интервала $(1,1 \dots 1,2)$, а в (8) е използвана осреднената стойност 1,15. Чрез този коефициент се отчита необходимостта от завишаване на реактивната мощност на кондензаторната батерия Q_{kc} . По този начин се осигурява желаната стойност на $\cos \phi_{ж}$, при неравномерно изменение на консумираната реактивна енергия V (мощност Q) от товара (Фиг. 4).

Изчислената реактивна мощност Q_{kc} (8) е необходимо да се закръгли до цяла стойност, която да бъде кратна на 2,5 kVAr и по-голяма от получената. Най-близката стойност, която отговаря на условията е 140 kVAr (Stefanov, St., & V. Ruseva, 2010).

Проектираната кондензаторна мощност следва да се управлява с подходящо устройство така, че да не се връща реактивна енергия в захранващата мрежа при по-малък товар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирана е кондензаторна батерия за компенсиране реактивната мощност на индукционна пещ, като са отчетени измененията на работните режими. Избрана е мощността на кондензаторната батерия $Q_{kc} = 140 \text{ kVAr}$ така, че да бъде по-голяма от изчислената и кратна на 2,5 kVAr. По този начин се гарантира, че в периодите на максималния и минималния товари компенсиращата реактивна енергия ще осигури желаната стойност на фактора на мощността.

Консумираната от индукционната пещ реактивна енергия се характеризира с неравномерни изменения във времето. По тази причина кондензаторната батерия е необходимо да се управлява с подходящо комутационно устройство, за да се поддържа желаната стойност на фактора на мощността във всеки момент и да не се връща реактивна енергия в захранващата мрежа.

REFERENCES

Baggini, A. (2008). Handbook of power quality. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England.

Gönen, T. (2014) Electric Power Distribution Engineering. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton.

Grigorov, Sv., & K. Koev (2023). Investigation on some electrical parameters during duty cycles of a metals melting electric induction furnace. 62nd Science Conference of Ruse University - Ruse. (Оригинално заглавие: Св. Григоров, К. Коев (2023). Изследване на някои електрически параметри по време на работни цикли на електрическа индукционна пещ за топене на метали. 62-ва научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев”).

Ordinance on regulating the prices of electric power № 1 of 14 March 2017, last change State Gazette № 41 of 10 May 2024 (Оригинално заглавие: Наредба № 1 от 14 март 2017 г. за регулиране на цените на електрическата енергия, посл. изм. и доп. ДВ. бр.41 от 10 май 2024 г.) URL: https://www.dker.bg/uploads/normative_docs/naredbi/Naredba_1_15052024.pdf (Accessed on 5.10.2024).

Stefanov, St., & V. Ruseva (2010). Electric power supply. University of Ruse “Angel Kanchev” press, Ruse. (Оригинално заглавие: Стефанов, Ст., В. Русева (2010). Електроснабдяване. Русенски университет „Ангел Кънчев”, Университетско издателство Русе).

Metrel (2021). Power Quality Analyser MI 2885 Master Q4. Manual.