

Національний університет «Львівська політехніка»
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
Технологічно-природничий університет

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРИФАЗНОГО
СТРУМОПІДВОДУ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАГРІВУ**

Вступ. Практично усі електродугові печі, в яких здійснюється переплавлення шихти з метою отримання електротехнічних сталей функціонують завдяки дії системи автоматичного керування (САК) переміщенням електродів. Такі системи забезпечують автоматичне запалювання дуги в кожній із трьох фаз живлення дуг, а також підтримання потужностей дуг відповідно до директивного графіка ведення плавки. Це здійснюється завдяки застосуванню імпедансного принципу регулювання [1-3], котрий полягає в тому, що напруга керування приводом електродів формується, як напруга розузгодження

$$\Delta_j = a_j I_{dj} - b_j U_{dj},$$

де I_{dj} , U_{dj} – діючі значення струмів і напруг дуг у j -й фазі; a_j, b_j – коефіцієнти (уставки), що визначають умову $\Delta_j = 0$, коли встановлюється певна довжина дуги і вводиться відповідна потужність у пічний простір.

Аналіз стану проблеми дослідження. Якщо вимірювання I_{dj} не є проблематичним, то U_{dj} безпосередньо виміряти неможливо. Це обумовлено тим, що дуга горить у замкнутому пічному просторі і підключити вимірювальну апаратуру до кінця електрода з дугою не має можливості. Тому вимірюють фазну напругу між виходом фаз пічного трансформатора і нульовою точкою, яку утворюють три дуги на шихті. За відомих параметрів гнучких струмопідводів (короткої мережі) та електродів кожної фази розраховуються спадки напруги на них, і тоді вже формується напруга U_{dj} , яка забезпечує функціонування САК переміщенням електродів. Таким чином, точність визначення параметрів гнучкого струмопідводу з електродами кожної фази впливає на введення потужності в пічний простір, а значить на ефективність експлуатації дугової сталеплавильної печі (ДСП). Як правило значення цих параметрів наводяться у довідковій літературі [4, 5] і вони зводяться до активних і реактивних опорів короткої мережі r_{kj} , x_{kj} , та електрода r_e . При цьому приймається, що ці параметри є однаковими в кожній фазі.

Постановка задач дослідження. Під час технологічного процесу виплавлення сталі в ДСП електроди по різному зношуються в кожній фазі, а тому електродотримачі займають різні рівні. Отже різною буде конфігурація гнучких струмопідводів кожної фази. Крім цього, між фазами короткої мережі сильно проявляється ефект взаємної індукції і явище переносу активної потужності між фазами, що його супроводжує. Таким чином, коротку мережу слід враховувати за допомогою власних індуктивностей L_{k11} , L_{k22} , L_{k33} , взаємних індуктивностей L_{k12} , L_{k23} , L_{k13} та відповідних активних опорів. Тоді індуктивність кожної фази короткої мережі можна представити еквівалентною величиною:

$$\left. \begin{aligned} L_{ек1} &= L_{k11} + L_{k23} - L_{k13} - L_{k12} \\ L_{ек2} &= L_{k22} + L_{k13} - L_{k12} - L_{k23} \\ L_{ек3} &= L_{k33} + L_{k12} - L_{k23} - L_{k13} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Вирази (1) отримані шляхом розв'язування магнітних зв'язків між трьома фазами струмопідводу. Визначення параметрів струмопідводу можливе за результатами вимірювань під час проведення серії експериментальних дослідів, котрі слід здійснювати після кожної заміни електрода хоча б в одній фазі, або й частіше. Власні та взаємні індуктивності найпростіше визначати через індуктивні опори. Вони мають сенс тільки при синусоїдних струмах та напругах.

Виклад матеріалу дослідження. Під час горіння дуг умова синусоїдності струмів та напруг в короткій мережі не виконується. Якщо ж реалізувати різні комбінації коротких замикань та неробочого ходу (дуга відсутня) у фазах, то є можливість практично усунути спотворення струмів і напруг з нижчої сторони пічного трансформатора. На діючій трифазній електродуговій печі можна реалізувати наступні досліди, за яких струми і напруги будуть синусоїдальними, зокрема трифазне к.з., а також три двофазних к.з., коли в третій фазі дуга відсутня. За цих умов напруги між фазами пічного трансформатора на нульовою точкою, доступ до яких забезпечує конструкція печі, можуть бути записані в комплексній формі. Так для трифазного к.з. запишеться:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1(r_{k1} + j\omega L_{k11}) + \dot{I}_2 j\omega L_{k21} + \dot{I}_3 j\omega L_{k31} \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2(r_{k2} + j\omega L_{k22}) + \dot{I}_1 j\omega L_{k12} + \dot{I}_3 j\omega L_{k32} \\ \dot{U}_3 &= \dot{I}_3(r_{k3} + j\omega L_{k33}) + \dot{I}_1 j\omega L_{k13} + \dot{I}_2 j\omega L_{k23} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Для к.з. в фазах 2 і 3 при неробочому ході у фазі 1:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_2 &= \dot{I}'_2 (r_{k2} + j\omega L_{k22} + j\omega L_{k32}) \\ \dot{U}'_3 &= \dot{I}'_3 (r_{k3} + j\omega L_{k33} + j\omega L_{k23}) \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Для к.з. в фазах 3 і 1 при неробочому ході у фазі 2:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}''_1 &= \dot{I}''_1 (r_{k1} + j\omega L_{k11} + j\omega L_{k31}) \\ \dot{U}''_3 &= \dot{I}''_3 (r_{k3} + j\omega L_{k33} + j\omega L_{k13}) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Для к.з. в фазах 1 і 2 при неробочому ході у фазі 3:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'''_1 &= \dot{I}'''_1 (r_{k1} + j\omega L_{k11} + j\omega L_{k21}) \\ \dot{U}'''_2 &= \dot{I}'''_2 (r_{k2} + j\omega L_{k22} + j\omega L_{k12}) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Під час проведення таких дослідів необхідно забезпечувати однакове положення електродотримачів відповідної фази, як в досліді трифазного к.з., та і дослідах двофазних к.з. За таких умов у рівняннях (2)–(5) відповідні власні і взаємні індуктивності будуть мати ті самі значення для різних дослідів. Однаковими також будуть відповідні активні опори. Слід зауважити, що в r_{kj} входять також активні опори електродів. Активні опори визначаються за показами ватметра та амперметра в кожній фазі.

Значення невідомих шести індуктивностей L_{k11} , L_{k22} , L_{k33} , $L_{k12} = L_{k21}$, $L_{k31} = L_{k13}$, $L_{k23} = L_{k32}$ можна розрахувати, як розв'язки перших шести рівнянь системи (2) – (4). Запишемо ці рівняння в проекціях на уявну вісь комплексної площини:

$$\left. \begin{aligned} U_1 \sin \alpha_1 &= I_1 r_{k1} \sin \beta_1 - I_2 \omega L_{k11} \cos \beta_1 - I_2 \omega L_{k12} \cos \beta_2 - I_3 \omega L_{k31} \cos \beta_3, \\ U_2 \sin \alpha_2 &= I_2 r_{k2} \sin \beta_2 - I_1 \omega L_{k12} \cos \beta_1 - I_2 \omega L_{k22} \cos \beta_2 - I_3 \omega L_{k23} \cos \beta_3, \\ U_3 \sin \alpha_3 &= I_3 r_{k3} \sin \beta_3 - I_1 \omega L_{k13} \cos \beta_1 - I_2 \omega L_{k23} \cos \beta_2 - I_3 \omega L_{k33} \cos \beta_3, \\ U'_2 \sin \alpha'_2 &= I'_2 (\omega L_{k22} + \omega L_{k23}), \\ U'_3 \sin \alpha'_3 &= I'_3 (\omega L_{k33} + \omega L_{k23}), \\ U''_1 \sin \alpha''_1 &= I''_1 (\omega L_{k11} + \omega L_{k13}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де $\alpha_1 \div \alpha_3$, $\alpha'_2 \div \alpha'_3$; α''_1 – аргументи векторів напруг $\dot{U}_1 \div \dot{U}_3$, $\dot{U}'_2 \div \dot{U}'_3$, \dot{U}''_1 відповідно; $\beta_1 \div \beta_3$ – аргументи векторів струмів $\dot{I}_1 \div \dot{I}_3$.

Розв'язавши систему рівнянь (6), отримаємо:

$$L_{k13} = \frac{I_2 \cos \alpha_2 (I_2 r_{k2} \sin \alpha_2 - U_2 \sin \beta_2 - U'_2 I_2 \cos \alpha_2 \sin \beta_2 / I_2' + I_3 r_{k3} \sin \alpha_3 - U_3 \sin \beta_3 - U'_3 I_3 \cos \alpha_3 \sin \beta_3 / I_2' - I_1 \cos \alpha_1 (I_1 r_{k1} \sin \alpha_1 - U_1 \sin \beta_1 - U''_1 I_1 \cos \alpha_1 \sin \beta_3 / I_3))}{\omega I_1 \cos \alpha_1 (I_2 \cos \alpha_2 - I_3 \cos \alpha_3 + I_1 \cos \alpha_1)},$$

$$L_{k12} = \frac{I_1 r_{k1} \sin \alpha_1 - U_1 \sin \beta_1 - U''_1 I_1 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 / I_1'' - (I_3 \cos \alpha_3 - I_1 \cos \alpha_1) \omega L_{k13}}{\omega I_2 \cos \alpha_2},$$

$$L_{k23} = \frac{I_3 r_{k3} \sin \alpha_3 - U_3 \sin \beta_3 - U'_3 I_3 \cos \alpha_3 \sin \beta_3 / I_2' - I_1 \cos \alpha_1 \omega L_{k13}}{\omega (I_2 \cos \alpha_2 - I_3 \cos \alpha_3)},$$

$$L_{k11} = U_1'' \sin \alpha_1'' / (\omega I_1'') - L_{k13},$$

$$L_{k22} = U_2' \sin \alpha_2' / (\omega I_2') - L_{k23},$$

$$L_{k33} = U_3' \sin \alpha_3' / (\omega I_3') - L_{k23}.$$

Так як вектори трьох струмів, що протікають при трифазному к.з. утворюють трикутник, то за умови $\beta_1 = 0$ (\dot{I}_1 – розміщено по осі дійсних чисел), отримаємо:

$$\beta_2 = -\pi + \arccos \left[\frac{(I_1^2 + I_2^2 - I_3^2)}{(2I_1 I_2)} \right],$$

$$\beta_3 = \pi - \arccos \left[\frac{(I_1^2 + I_3^2 - I_2^2)}{(2I_1 I_3)} \right].$$

Аргументи векторів напруг для такої векторної діаграми можна визначити наступним чином:

$$\alpha_1 = \arccos[P_1/(U_1 I_1)] + \beta_1,$$

$$\alpha_2 = \arccos[P_2/(U_2 I_2)] + \beta_2,$$

$$\alpha_3 = \arccos[P_3/(U_3 I_3)] + \beta_3,$$

$$\alpha_2' = \arccos \left[\frac{P_2'}{(U_2' I_1')} \right],$$

$$\alpha_3' = \arccos \left[\frac{P_3'}{(U_3' I_1')} \right],$$

$$\alpha_1'' = \arccos \left[\frac{P_1''}{(U_1'' I_1'')} \right],$$

де P_j – покази ватметра у фазах при відповідних дослідах, U_j, I_j – покази відповідних вольтметрів та амперметрів.

Запропонована методика була реалізована для визначення параметрів струмопідводу ДСП – 1,5. Так згідно довідникових даних [2] для цієї печі $r_k^d = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$, $x_k^d = 4,15 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

Для порівняльного аналізу цих даних з результатами отриманими на підставі експериментальних досліджень, значення параметрів усереднювалися (середньоарифметичне значення для трьох фаз).

Так для активного опору за результати експериментальних досліджень $r_k^e = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$. У цьому випадку відносне відхилення від довідникових даних є невеликим і становить $< 4\%$. У той же час для індуктивностей отримано такі значення: $L_{k11} = 14,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{k22} = 15,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{k33} = 11,92 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{k12} = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{k23} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{k13} = 3,45 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$. З урахуванням цих значень розраховано: $L_{ек1} = 10,65 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{ек2} = 8,95 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{ек3} = 8,57 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$. Тоді середньоарифметичне значення становить $L_{сеп}^e = 9,39 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, що відповідає реактивному опору $x_{сеп}^e = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$. У цьому випадку похибка становить майже 30%. Якщо ж не враховувати взаємних індуктивностей, то $L_{сеп}^{e*} = (L_{k11} + L_{k22} + L_{k33})/3 = 13,77 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$. Тоді похибка становить $\approx 4\%$. Звідси випливає, що в довідниках приводяться значення власних індуктивностей струмопідводу, а це тягне за собою зростання похибки визначення напруги дуги.

Висновки.

Проведення серії експериментальних досліджень дозволяє отримати достовірну інформацію про значення всіх параметрів короткої мережі. Завдяки цьому, визначення напруги дуги, яка бере участь у формуванні керуючого впливу САК переміщення електродів, здійснюється точніше, ніж на основі паспортних даних параметрів короткої мережі електродугової печі. Тим самим підвищується точність підтримання довжини дуги та забезпечується більш ефективне введення плавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М.Кручинин и др. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки дугового нагрева. Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1981. – 296с.
2. Соколов М.М., Грасевич В.Н. Электрооборудование механизмов электротермических установок.- М.: Энергоатомиздат. 1983. -320с.
3. Ситуаційне керування в дугових сталеплавильних печах: Монографія / Л.Д. Костинюк, А.О. Лозинський, О.Ю.Лозинський, А.В.Маляр, Я.Ю.Марущак, Я.С.Паранчук та ін. За ред. О.Ю. Лозинського, Я.Ю. Марущака. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 382с.
4. Электротехнологические промышленные установки. Под ред. А.Д. Свенчанского.-М.: Энергоиздат, 1982. – 400с.
5. Данцис Я.Б., Кацевич Л.С., Жилов Г.М. и др. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: Справочник. М.: Металлургия. 1984. 312с.