

УДК 621.365.6

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

*Метельський В.П., к.т.н., проф., Пачколін Ю.Е., к.т.н., Бондаренко О.О.*

*Запорізький національний технічний університет*

*69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64*

*E-mail: [rector@zstu.zaporizhzhе.ua](mailto:rector@zstu.zaporizhzhе.ua)*

Рассмотрена методика выбора тиристорных компенсаторов реактивной мощности и возможность их применения для электросталеплавления с целью уменьшения потерь электрической энергии, устранения вредного влияния на электрическую сеть и окружающую среду.

**Ключевые слова:** энергосбережение, электросталеплавления, сплавы металлов, тиристорный компенсатор реактивной мощности, экологичность.

Possibility and methods of choice of thyristor compensator of reactive power with the purpose of diminishing losses of electric energy and removal of harmful influence is examined on an electric network and environment.

**Key words:** energy-savings, electric furnace steelmaking, metals alloy, thyristor compensator of reactive power, ecological compatibility.

**Вступ.** Зважаючи на те, що існуюче електросталеплавильне виробництво є надзвичайно енергоємним та недостатньо ефективним і не відповідає сучасним вимогам успішного розвитку економіки України, в останні роки приділяється велика увага вирішенню питань, які пов'язані з удосконаленням сталеплавильного устаткування з метою покращення техніко-економічних та екологічних показників роботи.

**Аналіз попередніх досліджень.** На машинобудівних підприємствах для отримання фасонного литва використовуються, в основному, дугові електропечі невеликих розмірів. Плавлення металів в електропечах завдяки технологічній гнучкості дозволяє впроваджувати сучасні автоматизовані системи керування, отримувати сплави з наперед заданими властивостями, у тому числі прецезійні. Поряд зі значними перевагами, ці електропечі мають такі недоліки [1]:

- робота дугових печей характеризується різко змінним електричним навантаженням, що негативно впливає на електричну мережу живлення та інших споживачів;

- нестабільність електродугового переплаву та нестабільність самого процесу горіння дуги характеризується нерівномірністю теплового потоку, що призводить до підвищених витрат електродів та інтенсивного зносу футерування;

- процеси електросталеплавлення пов'язані зі значними витратами енерго- і матеріалоресурсів і, як наслідок, значними викидами газоподібних та твердих фракцій в атмосферу.

Спроби усунення цих недоліків за допомогою застосування конденсаторів без відповідного керування, бажаних результатів не дали, а зменшення шкідливих викидів за допомогою різних дорогих та малоефективних фільтрів призводить до значних фі-

нансових втрат, але майже не зменшує викиди в атмосферу.

**Мета роботи** - зменшення шкідливого впливу на електроустаткування та покращення енергетичних показників електричної мережі, яка живить електросталеплавильні печі, а також підвищення екологічності за рахунок використання запропонованих критеріїв розрахунків та вибору тиристорного компенсатора реактивної потужності.

**Матеріал і результати дослідження.** Реактивна потужність, що споживається електросталеплавильними печами, створює додаткові втрати електричної енергії під час її передавання та перетворення, обмежуючи можливості повного використання. Враховуючи це, необхідно знижувати перетоки реактивної потужності за рахунок компенсуючих пристроїв, які дозволяють споживачу генерувати цю енергію без споживання з мережі.

Але генерація реактивної потужності повинна дорівнювати споживанню в цілодобовому режимі. Інакше реактивна потужність, що генерується, потрапляючи в мережу, призводить до додаткових втрат, аналогічно тій, що споживається. Має місце так звана «перекомпенсація», що неприпустимо, через те, що вона призводить до підвищення напруги у споживачів і може негативно впливати на елементи захисту електричних мереж з порушенням селективності їх дії.

Застосування некерованих конденсаторних батарей не задовольняє сучасним вимогам до енергозбереження. Це пояснюється тим, що конденсаторні батареї постійно генерують потужність без регулювання, тобто в окремі проміжки часу вони покривають споживану потужність, а в інші - генерують в мережу. Крім цього конденсаторні батареї можуть вступати в резонанс з індуктивностями споживачів і

мережі, що призводить до резонансних перенапруг. Постійно ввімкнені конденсаторні батареї призводять до надмірного завищення напруги у споживачів у залежності від величини активної потужності. Ці перенапруги мають коливальний, затухаючий на частоті резонансу індуктивності мережі та ємності конденсаторних батарей, характер. Електросталеплавильні печі є споживачами реактивної потужності несинусоїдального характеру з наявністю спектра вищих гармонік [2] та різкозмінним навантаженням.

Враховуючи наявність вищих гармонік споживання потужності, конденсаторні батареї виконуються з фільтрами вищих гармонік і поєднанням компенсації реактивної потужності. У мережах, які

живлять електросталеплавильні печі, доцільно використовувати повністю керовані тиристорні компенсатори реактивної потужності (ТКРП). В основу таких ТКРП покладено застосування фільтрів вищих гармонік і паралельно регульованого споживача реактивної потужності на базі керованого реактора за допомогою тиристорних ключів.

Тиристорний регулятор потужності має високу швидкість (10 – 20 мс), що запобігає передачі надлишків потужності, яка генерується в мережу. Встановлення таких ТКРП призначено для локальної компенсації реактивної потужності з фільтрацією вищих гармонік (рис. 1) [3].

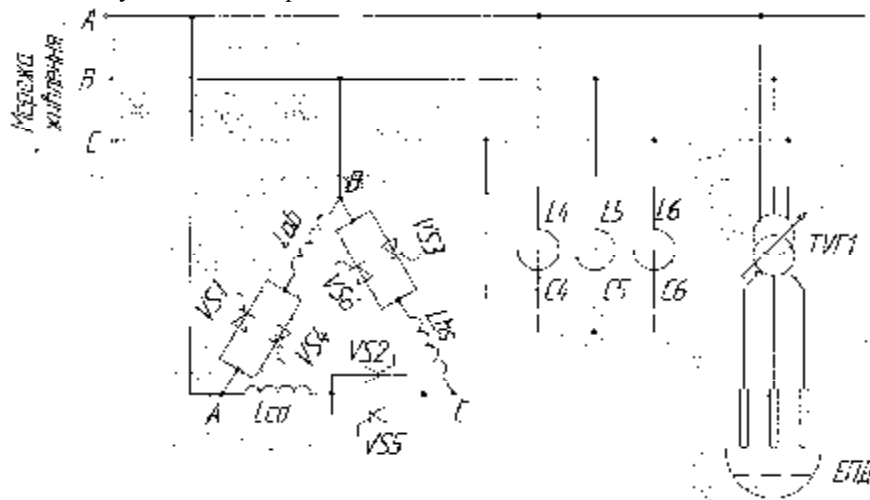


Рисунок 1 – Схема підключення тиристорного компенсатора реактивної потужності

З існуючих методик компенсації реактивної потужності впливає, що вибір способу компенсації залежить від характеру навантажень споживача й вирішується індивідуально. Потужність, що споживається, визначається за формулами:

$$P = 3E_2 I_2 \cos \varphi ; \quad (1)$$

$$Q = 3E_2 I_2 \sin \varphi , \quad (2)$$

де  $E_2$  — фазна напруга в розрахунковій точці приведеної напруги до розрахункової схеми;  $I_2$  — фазний струм в точці розрахунку;  $\varphi$  — кут зсуву між напругою та струмом.

Для мостового перетворювача:

$$P = \frac{9}{2\pi} \frac{E_2^2}{X_\gamma} \sin(2\alpha + \gamma) \sin \gamma , \quad (3)$$

$$Q = \frac{9}{2\pi} \frac{E_2^2}{X_\gamma} [\gamma - \cos(2\alpha + \gamma) \sin \gamma] , \quad (4)$$

де  $X_\gamma$  — реактанс однієї фази в зоні комутації;  $\alpha$  — кут керування перетворювачем;  $\gamma$  — кут комутації вентилів.

Основним критерієм оцінки ефективності ТКРП — споживання електричної енергії з  $\cos \varphi \approx 1$  на границі розподілу електричних мереж,

там де встановлені лічильники реактивної потужності. Коефіцієнт несинусоїдальності за діючими стандартами не може перевищувати 5% і визначається за формулою:

$$K_{нс} = 100 \sqrt{\sum_{v=2}^n \left( \frac{U_v}{U_1} \right)^2} , \quad (5)$$

де  $U_v$  — діюче значення напруги  $v$ -гармоніки;  $U_1$  — діюче значення основної гармоніки;  $v$  — порядковий номер гармоніки, яка враховується вище  $v = 2$ ;

Величина  $U_v$  визначається за формулою:

$$U_v = I_v \cdot v \cdot U_{нл} \cdot U_1 \cdot \frac{1}{S_k} , \quad (6)$$

де  $I_v$  — діюче значення фазного струму  $v$ -гармоніки;  $U_{нл}$  — напруга нелінійного навантаження;  $S_k$  — потужність короткого замикання в точці приєднання нелінійного навантаження.

На практиці для електросталеплавильних печей достатньо враховувати тільки 2, 4, 5 та 7 гармоніки. Величина струму гармонік залежить від потужності печей та для практичних розрахунків рекомендується приймати (рис. 2).

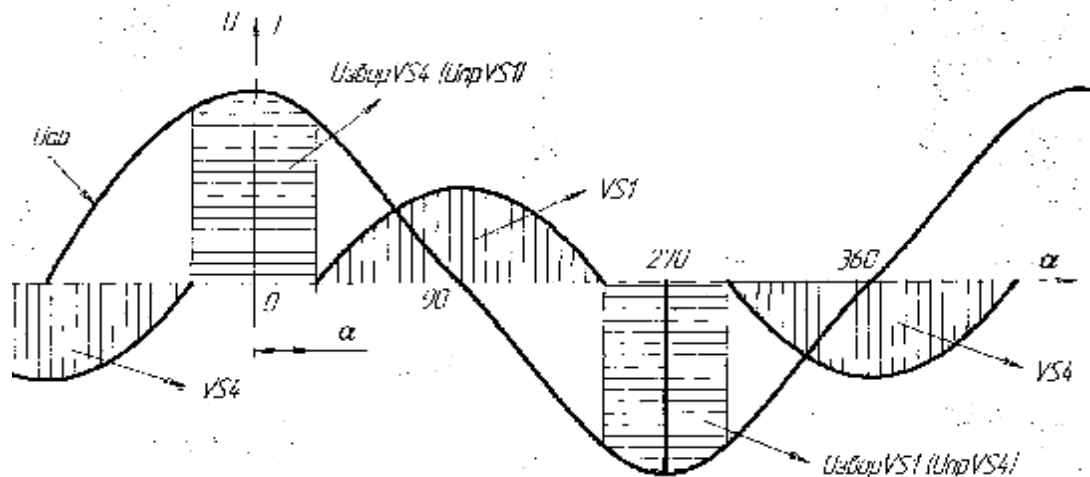


Рисунок 2 – Графік залежності струму і напруги на плечі АВ ТКРП від кута регулювання  $\alpha$

$$I_v = I_{пт} / \sqrt{v^2}, \quad (7)$$

де  $I_{пт}$  — струм пічного трансформатора під час розплавлення.

Як відомо, силові компенсуючі конденсатори допускають перевантаження за напругою до  $1,1 \cdot U_{1к}$ . Величину перевантаження за напругою визначають за формулою:

$$U_{нк} = \sqrt{\sum_{v=1}^n U_v^2} \leq 1,1 U_{1к}, \quad (8)$$

де  $U_{1к}$  — діюча напруга конденсаторів.

Перевантаження за струмом допускається до  $1,5 \cdot I_{1к}$  й визначається за формулою:

$$I_{нк} = \sqrt{\sum_{v=1}^n I_v^2} \leq 1,5 I_{1к}, \quad (9)$$

де  $I_{1к}$  — діюче значення струму конденсатора  $I_{1к} = U_n \cdot \omega \cdot C$ ;  $\omega$  — номінальна частота конденсатора;  $C$  — номінальна ємність конденсатора.

Для виявлення небезпечних резонансних явищ струму проводиться перевірка за існуючими в мережі гармоніками:

$$v = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{1}{L_i \cdot C_i}}, \quad (10)$$

де  $L_i$  — сумарна індуктивність фільтрової індуктивності та реактанса мережі для кожної конденсаторної батареї фільтру;  $C_i$  — ємність робочої батареї.

Величина  $v_1$  не повинна співпадати з номером гармоніки, існуючої в мережі, в протилежному випадку необхідно змінити потужність фільтру. Оцінку сумісності конденсаторних батарей та фільтрів необхідно виконувати з урахуванням можливих змін режимів живлення споживача та аварійних режимів.

**Висновки.** За результатами досліджень була запропонована методика визначення критеріїв сумісності конденсаторних батарей та фільтрів, що дала можливість вибрати та рекомендувати до впровадження у виробництво тиристорні компенсатори

реактивної потужності в мережах живлення ливарних цехів машинобудівних підприємств м. Запоріжжя. Експлуатація тиристорних компенсаторів реактивної потужності, обраних за запропонованою методикою протягом декількох років, підтвердила доцільність їх застосування. Термін окупності капітальних витрат на придбання та встановлення ТКРП не перевищує 2 років. Зважаючи на постійне зростання вартості енергоносіїв, покращення енергозбереження ливарного виробництва у такий спосіб є актуальним.

На сьогодні заводом «Перетворювач» освоєне серійне виробництво тиристорних компенсаторів реактивної потужності напругою 6, 10 кВ потужністю до 20 Мвар з фільтрами вищих гармонік, а також ведуться роботи з удосконалення фільтрокомпенсуючих пристроїв на основі активних фільтрів.

Світовий та вітчизняний досвід експлуатації ТКРП показує, що окрім підвищення енергоефективності та екологічності, значно покращується якість металу, зменшуються експлуатаційні витрати. Це дозволяє швидко повернути вкладені кошти та підвищити конкурентоспроможність металургійного виробництва.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Свенчанский А.Д., Трейзон З.Л., Миухин Л.А. Электроснабжение и автоматизация электротермических установок. — М.: Энергия, 1980. — 290 с.
2. Турковський В.Г. Зменшення електромагнітного впливу дугових сталеплавильних печей змінного струму та витрат електроенергії в них // Efficiency and power quality of electrical supply of industrial enterprises. — 2000. — С. 247 — 249.
3. Андриенко П.Д., Санької С.А., Машьянов В.Г., Ковальов Г.В. Перспективні напрями в розвитку джерел живлення для електротехнологій // Електротехніка і електроенергетика, № 2, 2000. — С. 47 — 50.

Стаття надійшла 11.04.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.