

УДК 669.71

Г. І. Щербань, асп.

ДО ПИТАННЯ ПРО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ СЕРІЇ АЛЮМІНІЄВИХ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІВ

Наведено результати теоретичного дослідження керування струмом серії електролізерів, метою якого є зниження вартості устаткування кремнієво-перетворювальної підстанції (КПП), контролю технологічних параметрів алюмінієвих електролізерів і мінімізації впливу анодних ефектів на випрямлячі КПП. Обговорено нові технології керування струмом серії за допомогою інтелектуальних систем контролю технологічних параметрів, що дозволяють підвищити якість управління процесом.

Вступ

Серія алюмінієвих електролізерів і кремнієво-перетворювальна підстанція (КПП) як єдина технологічна система

Елементами системи є випрямлячі КПП як джерело енергії і серія електролізерів як споживач енергії. Електричні параметри серії електролізерів внаслідок змін міжполюсної відстані, зворотної ЕРС і питомого опору електроліту, а також періодично виникаючих анодних ефектів піддаються нестабільним коливанням. Це призводить до того, що сила струму серії не є постійною в часі, а її різкі коливання при анодних ефектах викликають негативні явища, як в алюмінієвому електролізері, так і на випрямлячах КПП, тому на підприємствах прагнуть ці коливання мінімізувати стабілізацією заданого значення струму серії.

Стабілізація струму серії сприяє оптимізації енергетичного режиму електролізерів і збільшенню економічної ефективності процесу електролізу, хоча це знижує коефіцієнт потужності ($\cos \phi$), збільшує втрату енергії на перетворення [1] і вимагає для ефективної роботи КПП додаткового устаткування для стабілізації струму серії при анодних ефектах [2] з ускладненими законами регулювання випрямленої напруги [3]. Оптимальним рішенням було б досягнення таких режимів на електролізерах серії, за яких підтримуються оптимальні значення ЕРС і електричного опору кожної ванни [1], відсутні анодні ефекти, а незначні коливання струму серії дозволяють кондуктометричними та вольтамперними методами отримати додаткову інформацію про стан кожного електролізера в серії [4, 5, 6] і оптимізувати режими роботи як устаткування КПП, так і електролізерів серії.

Метою роботи є оптимізація енергетичного режиму серії електролізу алюмінію. Відповідно до поставленої мети були визначені такі завдання:

- дослідити взаємовплив випрямляча й алюмінієвого електролізера.
- розробити режим регулювання струму серії зі зниженням вартості устаткування й підвищенням техніко-економічних показників електролізера.

Існуючий стан енергозабезпечення серії електролізерів

Особливості роботи елементів технологічної системи — випрямляча й електролізера

У промислових установках застосовують різні схеми випрямлення трифазної змінної напруги в постійну, кожна з яких має свої переваги й недоліки. У загальному випадку розглядається найпоширеніша, мостова схема (рис. 1).

На КПП для згладжування пульсацій випрямленої напруги послідовно з навантаженням включається згладжувальний фільтр (дросель), крім того, пульсації напруги на виході випрямляча згладжуються завдяки ємнісному характеру навантаження [7]. Повне електричне коло з випрямляча й електролізера міс-

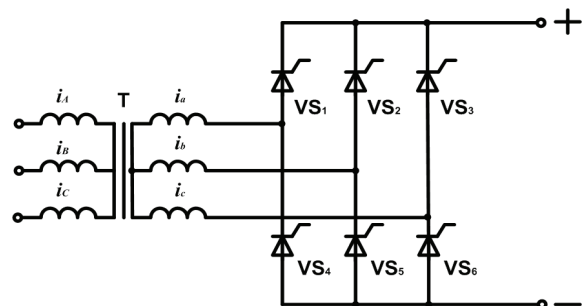


Рис. 1. Мостова схема випрямлення трифазного змінного струму в постійний

тять генератор змінної ЕРС $\bar{e}(t)$, яка після випрямляча стає постійною зі змінною складовою пульсацій, тому випрямляч необхідно також розглядати як джерело постійної напруги з внутрішнім опором. До полюсів випрямляча підключене навантаження, що є комбінацією активного опору R , реактивних елементів – дроселя L і електричної ємності СДС, генератора постійної ЕРС E_0 , підключеного зустрічно до ЕРС ЕОТ випрямляча (рис. 2). Особливість роботи випрямляча при живленні постійним струмом електролітичних ванн полягає в тому, що такого роду споживачі мають власну постійну ЕРС E_0 , яка спрямована назустріч напрузі випрямляча, що відповідає випадку навантаження на зустрічну ЕРС. Такий вид навантаження характерний у разі живлення від випрямлячів акумуляторів, електролізерів, електродвигунів, потужних конденсаторів тощо. За наявності проти-ЕРС струм I_c у навантаженні починає протікати, коли значення випрямленої напруги E_{OT} перевищує ЕРС навантаження E_0 , тому що тільки за цієї умови до вентилів буде прикладена пряма напруга й вони будуть проводити струм.

Кожний електролізер зазнає постійної зміни величин міжполюсної відстані й концентрації глинозему, а отже, зворотної ЕРС і внутрішнього опору. Оскільки всі електролізери серії підключені послідовно, то сума всіх опорів електролізерів є опором серії, а сума всіх ЕРС електролізерів є ЕРС серії, сума опорів шинопроводів є опором провідників серії [1]. Таким чином, еквівалентна схема серії електролізерів може бути відображена в одному електролізері, де параметрам одного електролізера відповідають сумарні значення параметрів електролізерів серії. Для спрощення, електрохімічний елемент має не внутрішній опір, а зовнішній, який залежить від міжполюсної відстані й питомого опору електроліту.

Кожне джерело електроенергії характеризується зовнішньою характеристикою — залежністю випрямленої напруги на виході від струму навантаження за постійної напруги живлення. Рівняння зовнішньої характеристики випрямляча за лінійного характеру навантаження $U_0 = f(I_0)$ має такий вигляд:

$$U_0 = E_{OT} - I_C r_{OT}, \quad (1)$$

де U_0 — напруга випрямляча; E_{OT} — ЕРС випрямляча; I_C — струм серії; r_{OT} — внутрішній опір випрямляча.

Алюмінієвий електролізер є нелінійним навантаженням для випрямляча, тому що є зустрічним джерелом ЕРС. Рівняння його зовнішньої характеристики має такий вигляд:

$$U_P = E_0 + I_C R_{ел}, \quad (2)$$

де U_P — робоча напруга електролізера; E_0 — зворотна ЕРС електролізера; $R_{ел}$ — активний опір електролізера

Згідно з законом Ома для замкнутої ділянки кола, що містить джерело ЕРС і правил Кірхгофа, за умови незмінної напруги на первинних обмотках трансформатора, на коливання струму електролізера впливають дві величини, що змінюються в часі — зворотна ЕРС електролізера E_0 і опір електролізера $R_{ел}$. Причиною значної зміни внутрішнього опору електролізера $R_{ел}$ є анодні ефекти, а незначних — зміни в часі концентрації глинозему й міжполюсної відстані, які зумовлені згорянням анода, зміною висоти металу в подині й подачами анода. Виникнення анодного ефекту рівнозначно значному збільшенню опору $R_{ел}$ у замкнутому колі на величину різниці між опором електролізера при спалаху й опором за нормальної роботи [1], що відбивається в коливаннях струму серії й напруги в навантаженні.

Для випадків виникнення й гасіння анодних ефектів на КПП необхідно постійно мати резервні агрегати й стабілізувати струм серії, тому що при цьому різко й значно зростає споживана серією потужність, що впливає на роботу підстанції й енергосистеми. Для вирішення цього завдання зви-

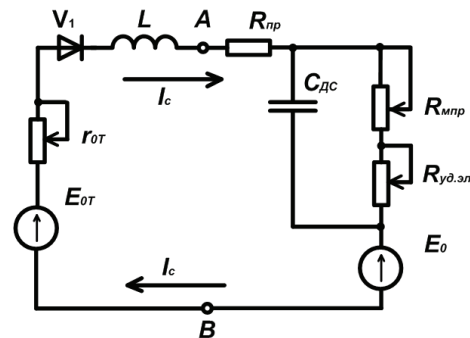


Рис. 2. Еквівалентна схема випрямляча та серії електролізерів: E_{OT} — випрямлена ЕРС трансформатора; r_{OT} — повний опір втрат у випрямлячі (внутрішній опір); V_1 — вентиль; L — дросель; E_0 — ЕРС серії; $R_{шп}$ — опір електроліту, що залежить від міжполюсної відстані; $R_{уд.эл}$ — опір електроліту, що залежить від концентрації глинозему; $R_{шп}$ — опір струмопідводів і шинопроводів; $C_{ДС}$ — ємність подвійного шару електроліту; I_C — струм серії, А і В — точки поділу КПП і електролізерів серії

чайно змінюють ЕРС вторинної обмотки шляхом зміни коефіцієнта трансформації за допомогою обладнання регулювання під напругою (РПН), що має обмежений ресурс експлуатації, або за допомогою керування тиристорних агрегатів, що дозволяють обмежувати аварійні струми й уникнути небезпечних для трансформатора ефектів. Таким чином, основними методами стабілізації струму серії з метою мінімізації впливу анодних ефектів є застосування випрямлячів з малим внутрішнім опором (виконується умова $r_{OT} \ll R_{ел.}$), або постійна корекція r_{OT} залежно від величини відхилення поточного значення параметра за заданим способом стабілізації (струм, напруга, потужність) [1].

Проведення експериментів і обговорення результатів

Незважаючи на стабілізацію струму серії, струм і напруга серії ніколи не були константами й завжди містили в собі постійну й змінну складові, при цьому електроліз фактично відбувався у разі накладання змінного струму, що має свої позитивні сторони [8]. Зміна напруги серії на ΔU викликає відносно більші зміни струму ΔI і ще більші зміни потужності ΔP [9], тому що зворотна ЕРС E_0 становить близько 30 % від робочої напруги U_p на електролізері, падіння напруги в міжполюсної відстані перевищує 30 % робочої напруги й досягає 50 % сумарного омичного спаду напруги на конструктивних елементах електролізера.

Із усіх складових опору електролізера, змінним є тільки опір електроліту, значення якого залежить від змінних у часі міжполюсної відстані, складу й температури електроліту. Склад й температуру електроліту протягом короткого часу змінити складно й нерационально, оскільки це вкрай негативно вплине на технологічний процес. Зміна ж міжполюсної відстані дозволяє оперативно змінювати опір електроліту й електролізера в цілому [1], але для того щоби проводити такі впливи, потрібна вимірювальна інформація про поточні значення питомого опору електроліту й міжполюсної відстані, інакше це спричинить технологічні відхилення в роботі ванни. Крім того, такі впливи мають бути незначними й короткочасними.

Регулювання опору електролізера $R_{ел.}$ дозволяє керувати одночасно струмом і напругою серії, оскільки передбачає відсутність значних коливань опору електролізерів і зниження величини робочої напруги електролізера, тобто енергоємність процесу. У літературних джерелах не виявлено даних щодо застосування методу стабілізації енергетичних параметрів КПП по живленню струмом серії, який передбачав би регулювання не величини внутрішнього опору випрямляча r_{OT} , а опору електролізера $R_{ел.}$, хоча відомий спосіб регулювання струму залежно від стану електрохімічної комірки [10—12]. Але цей спосіб не передбачав зміну міжполюсної відстані для регулювання струму заряду в залежності від стану електрохімічної комірки, оскільки призначений для звичайних акумуляторів з фіксованою міжполюсною відстанню.

Розглядаючи електролізер, як акумулятор у режимі заряду, закон ампер-годин (закон Вудбріджа) стосовно до алюмінієвого електролізера, говорить, що для електролізера необхідно постійно підтримувати деяку величину зворотної ЕРС, оптимальну для величини номінального струму серії, температуру й опір електроліту при заданому значенні міжполюсної відстані, що дозволяє вести безаварійний процес електролізу з мінімальною енергоємністю.

Розглядаючи електролізер як акумулятор у режимі заряду, закон ампер-годин (закон Вудбріджа) щодо алюмінієвого електролізеру, говорить: за номінального струму для такого типу електролізера, необхідно постійно підтримувати деяку величину зворотної ЕРС, оптимальну для величини струму серії, температуру й опір електроліту із заданим значенням міжполюсної відстані, що дозволяє вести безаварійний процес електролізу з мінімальною енергоємністю.

Зміна опору одного електролізера в серії шляхом короткочасної подачі анода практично не позначиться на сумарному опорі всієї електролізної серії, але зміна опору всіх електролізерів вплине на значення сумарного опору серії й, відповідно, струму серії. Одночасна зміна міжполюсної відстані на всіх електролізерах не прийнятна з кількох причин: значна й різка зміна опору серії викличе зміну струму серії, що аналогічно впливу анодного ефекту на випрямляч; одночасна робота всіх електродвигунів приводів переміщення анода на всіх електролізерах викличе перевантаження в колах їх живлення. Отже, для отримання позитивного результату, зміну опорів електролізерів необхідно рознести в часі, тобто зміна міжполюсної відстані кожного електролізера має проводитися по черзі на кожному електролізері й на незначну величину, але сумарна зміна на всіх електролізерах дозволяє повільно змінювати напругу й струм серії в заданих межах.

У процесі дослідження розглянуто зміну струму серії з 146 електролізерів типу БТ-75 з самови-

палювальним анодом та боковим струмопідводом, з середнім струмом серії 71 кА.

Відомо, що значення оптимальних технологічних параметрів індивідуальні для кожного електролизера, тому що це зумовлено конструкцією, строком експлуатації, складом електроліту і якістю анодної маси, особливостями монтажу й випалу під час пуску і т. д. Для спрощення в розрахунках приймалися однаковими опір електроліту, міжполюсна відстань, зворотна ЕРС на всіх електролізерах серії.

Подача анода вгору або вниз на мінімальну величину для зміни міжполюсної відстані й опору електролизера з певним періодом послідовно на кожному електролізері серії (рис. 3), дозволяє отримати в сумі таку зміну опору серії, яка протифазно змінює струм і напругу, при цьому потужність випрямляча серії залишається практично незмінною [13]. У цьому випадку коливання струму й напруги мають наднизькочастотну змінну складову (рис. 4.), яка має змінюватись за майже гармонічним законом.

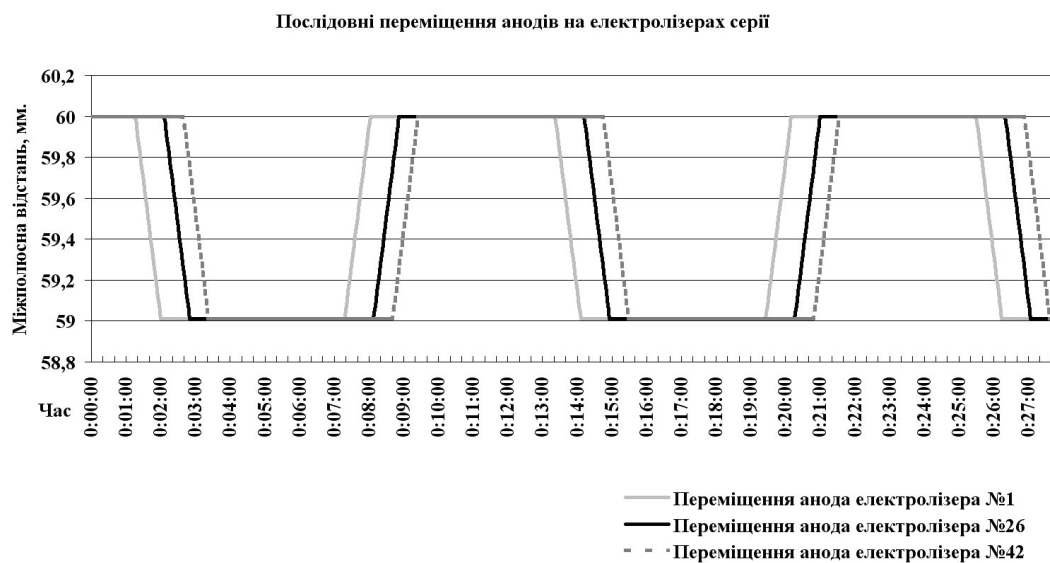


Рис. 3. Подачі анодів на електролізерах зі зсувом у часі

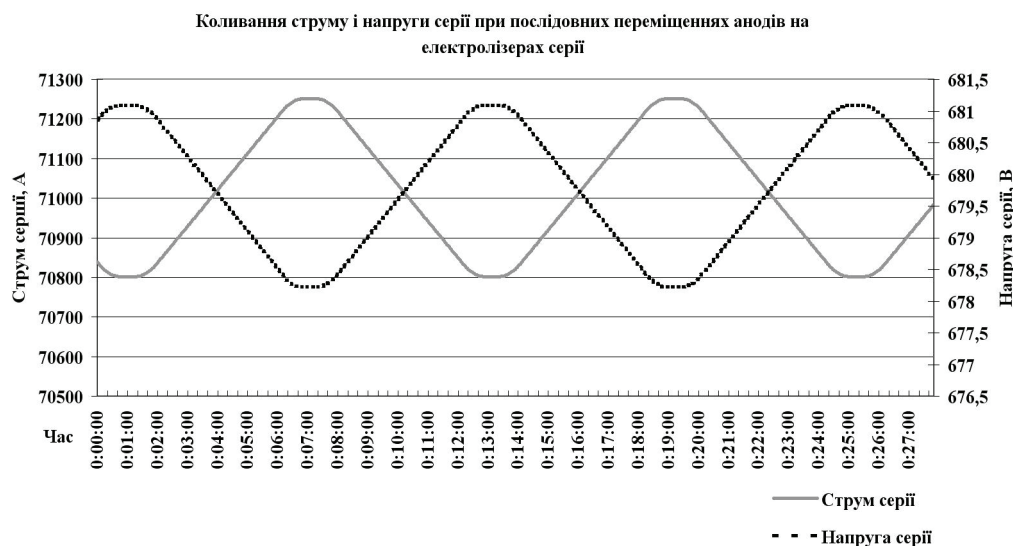


Рис. 4. Струм і напруга серії керовані за допомогою подач анодів на електролізерах серії

Такий підхід дозволяє управляти струмом випрямляча в допустимих межах [14] і зменшити споживання електроенергії в мережі живлення КПП [15], а по коливаннях струму серії електролізерів постійно контролювати електричні параметри (зворотна ЕРС, активний опір ванни, питомий опір електроліту, міжполюсна відстань) кожного електролизера за кондуктометричними та вольт-амперними методами [4—6, 16—19]. Використання цих параметрів у системах автоматизації дозволяє знизити кількість технологічних відхилень на електролізерах.

Висновок

Запропоноване рішення з узгодження випрямляча з навантаженням, використання якого дозволяє управляти струмом серії електролізерів в допустимих межах та вести постійний контроль технологічних параметрів кожного електролізера й серії в цілому. Його реалізація дасть можливість підприємствам знизити вартість устаткування КПП і ефективніше вести процес електролізу на серії ванн із підвищенням їх техніко-економічних показників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Металлургия алюминия / [Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин и др.] — Новосибирск : Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. — 438 с. — Библиогр. : с. 427. — ISBN 5-02-031632-6.
2. Электротехнологические промышленные установки : учеб. пос. / [И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова, А. Д. Свенчанский] ; под ред. А. Д. Свенчанского. — М. : Энергоиздат, 1982. — 400 с. : ил. Библиогр. : С. 393—395.
3. Бобков В. А. Силовая преобразовательная техника для мощных электротехнических установок постоянного тока / В. А. Бобков, А. В. Бобков, В. С. Копырин // Компоненты и технологии : Силовая электроника. — 2004. — № 1. — С. 88—91.
4. Ремпель С. И. Анодный процесс при электролитическом производстве алюминия / С. И. Ремпель. — Свердловск : Metallurgizdat, 1961. — 144 с.
5. Громыко А. И. Автоматический контроль технологических параметров алюминиевых электролизеров / А. И. Громыко, Г. Я. Шайдунов. — Красноярск : изд-во КГТУ, 1984. — 240 с.
6. Использование цифровой обработки сигналов для определения параметров процесса электролиза / [Г. И. Щербань, А. И. Громыко, П. И. Луценко и др.] // Алюминий Сибири : сб. науч. статей. — Красноярск : ООО «Версо». — 2008. — С. 220—221 — Библиогр. : с. 221. (6 назв.)
7. Нетушил А. В. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники / А. В. Нетушил. — М. : Высшая школа, 1986. — 224 с.
8. Изгарышев Н. А. Курс теоретической электрохимии / Н. А. Изгарышев, С. В. Горбачев. — Москва : Госхимиздат, 1951. — 503 с.
9. Галевский Г. В. О возможности модуляции тока на сериях алюминиевых электролизеров в России / Г. В. Галевский, М. Я. Миндис // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сб. науч. тр. — Вып. 27 : Сибирский государственный индустриальный университет. — Новокузнецк, 2011. — 262 с., ил.
10. Woodbridge J. L. Storage Battery Charging Trans. Am. Inst. Elec. Eng. 54, 516 (1935)
11. Woodbridge J. L. Storage battery charging system [Электронный ресурс] / Woodbridge J. L. // U. S. Patent 2,013,618. — 3 Sept. 1935. — Режим доступа : <http://ip.com/patent/US2013618>.
12. Woodbridge J. L. Means for controlling the charge of a storage battery [Электронный ресурс] / J. L. Woodbridge // U. S. Patent 1, 786, 280. — 23 Dec. 1930. — Режим доступа : <http://ip.com/patent/US1786280>.
13. Сергеенков Б. Н. Электрические машины : Трансформаторы : учеб. пос. для спец. вузов / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова ; под ред. И. П. Копылова. — М. : Высш. шк., 1989. — 352 с.
14. ГОСТ 16772-77 — Трансформаторы и реакторы преобразовательные. Общие технические условия.
15. ГОСТ 13109-97 — Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
16. Антипин Л. Н. Электрохимия расплавленных солей / Л. Н. Антипин, С. Ф. Важенин. — М. : Metallurgizdat, 1964. — 355 с.
17. Отто М. Современные методы аналитической химии : в 2 т. Т. 1 ; пер с нем. / М. Отто ; под ред. А. В. Гармаша. — М. : Техносфера, 2003. — 416 с. : ил. — ISBN: 5948360148.
18. Контроль обратной ЭДС и общего сопротивления алюминиевого электролизера / [Г. И. Щербань, И. Е. Лукошников, Д. В. Прутцков и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 3/6 (51). — С. 14—17.
19. К вопросу о снижении энергоемкости процесса электролиза алюминия [Текст] / [Г. И. Щербань, И. Е. Лукошников, Д. В. Прутцков и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 4/8 (58). — С. 17—21. — Библиогр. : с. 20. (13 назв.)

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 20.02.2013
Рекомендована до друку 29.03.2013

Щербань Геннадій Іванович — аспірант кафедри металургії кольорових металів Запорізької державної інженерної академії; заступник начальника відділу механізації і автоматизації виробничих процесів ПАТ «Завод напівпровідників», Запоріжжя