

УДК 621.35:669.1

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-20>

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ Q-ONE ВІД КОМПАНІЇ DANIELI AUTOMATION

Кононюк Денис Володимирович,

головний електрик

Товариства з обмеженою відповідальністю «Метінвест Січсталь»,

Голова Асоціації випускників

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

ORCID ID: 0009-0004-0794-4781

Рухлов Артем Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-9430-8396

Автори статті виконали аналітичний огляд системи Q-One від компанії Danieli Automation, яка призначена для ефективного електрозабезпечення основного електросталеплавильного устаткування (дугові печі, установки «ківш-під» тощо). Така інноваційна система поступово набуває популярності у світових провідних металургійних виробників завдяки реалізації концепції «чистої шини живлення» з погляду підтримання низького значення коефіцієнта несинусоїдальності напруги та високого коефіцієнта потужності. Для визначення сильних і слабких сторін запропонованої технології в статті розглянуто «класичний» спосіб електропостачання сталеплавильних печей за допомогою пічних трансформаторів та фільтрокомпенсувальних пристроїв. Автори наголошують, що за такого способу фахівці електротехнічних служб борються з наслідками проблеми низької якості електричної енергії в мережах металургійних підприємств, тоді як система Q-One успішно «бореться» з її джерелом. Саме тому в роботі розглядається структура та основні елементи запропонованої італійськими фахівцями технології. Окрім цього, на підставі аналізу відкритих джерел інформації автори формують досить вичерпний перелік її переваг та недоліків порівняно з «класичним» способом електрозабезпечення електросталеплавильного устаткування. Висновок автори формують у вигляді рекомендації критично оцінювати потенційні переваги для конкретних умов впровадження системи Q-One, особливо на металургійних підприємствах України.

Ключові слова: електросталеплавильне виробництво, технологія Q-One, якість електроенергії, пічний трансформатор, система електрозабезпечення.

Kononyuk Denys, Rukhlov Artem. Analytical review of q-one technology from danieli automation

The authors of the article provide an analytical review of the Q-One system from Danieli Automation, which is designed to provide efficient power supply to the main electric steelmaking equipment (arc furnaces, ladle furnaces, etc.). This innovative system is gradually gaining popularity among the world's leading steelmakers due to the implementation of the "clean power bus" concept in terms of maintaining a low voltage duty cycle and high power factor. In order to determine the strengths and weaknesses of the proposed technology, the article considers the "classical" method of power supply to steelmaking furnaces using furnace transformers and filter-compensating devices. The authors emphasise that with this method, electrical engineers struggle with the consequences of the problem of low power quality in the networks of metallurgical enterprises, while the Q-One system successfully "fights" with its source. That is why this paper discusses the structure and main elements of the technology proposed by Italian experts. In addition, based on the analysis of open sources of information, the authors form a fairly comprehensive list of Q-One's advantages and disadvantages compared to the "classical" method of power supply for electric steelmaking equipment. The authors conclude the paper with a recommendation to critically evaluate the potential advantages for specific conditions of implementation of the Q-One system, especially at metallurgical enterprises in Ukraine.

Key words: electric steelmaking, Q-One technology, power quality, furnace transformer, power supply system.

Вступ. В умовах стрімкої декарбонізації світу галузь металургії також активно розглядає для себе заходи, покликані скоротити викиди парникових газів. У металургійній сталеплавильній галузі провідні світові постачальники технології фокусують свою увагу на електрометалургії. Електрометалургія – це галузь прикладної

науки й технології, що вивчає фізико-хімічні процеси та електричні явища під час первинного виробництва металів із руд, а також виплавляння сталі, феросплавів, кольорових металів та їх сплавів у металургійних агрегатах, у яких електрична потужність перетворюється на технологічну теплову [1].

«Серцем» електросталеплавильної галузі є дугова сталеплавильна піч (ДСП, electric arc furnace), установка «ківш-піч» (УКП, ladle-furnace) та пічка типу Smelter, які є найбільшими та найпотужнішими споживачами електричної енергії. Їх робота в класичному виконанні передбачає використання спеціального обладнання – пічного (дугового) трансформатора (furnace transformer) та фільтро-компенсуючого пристрою (ФКП, static var compensator SVC). Завдяки такому трансформатору створюється контрольований режим короткого замикання, що супроводжується високим виділенням температури для плавлення металу за допомогою змінних електродів (рис. 1).

Однак, крім корисного ефекту у вигляді високої температури, робота пічного трансформатора в режимі короткого замикання призводить до значного спотворення форми напруги та струму електричної живильної мережі, а також великого реактивного навантаження з відповідно низьким значенням коефіцієнта потужності. Це негативно позначається як на роботі самого трансформатора (підвищений шум,

вібрація, нагрівання обмоток, знижений коефіцієнт потужності, високі втрати електроенергії тощо), так і на функціонуванні іншого численого електрообладнання, що живиться від цієї електричної мережі. Саме для мінімізації таких негативних наслідків у класичній схемі електропостачання застосовується ФКП.

Водночас інжиніринг систем, що забезпечують електроенергією сталеплавильні виробництва, має враховувати допустимі рівні показників її якості, як-от: відхилення та коливання напруги та частоти, несиметрія напруги, несинусоїдальність, провали та імпульси напруги тощо. До того ж чинні в Україні та світі нормативні документи в галузі електромагнітної сумісності встановлюють нормально та гранично допустимі значення не тільки загального коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги, а й окремих гармонійних складників залежно від класу напруги [2; 3].

За таких умов виробники обладнання, науковці та інжинірингові компанії, будуючи системи електрозабезпечення, дедалі частіше шукають варіанти розв'язання проблеми

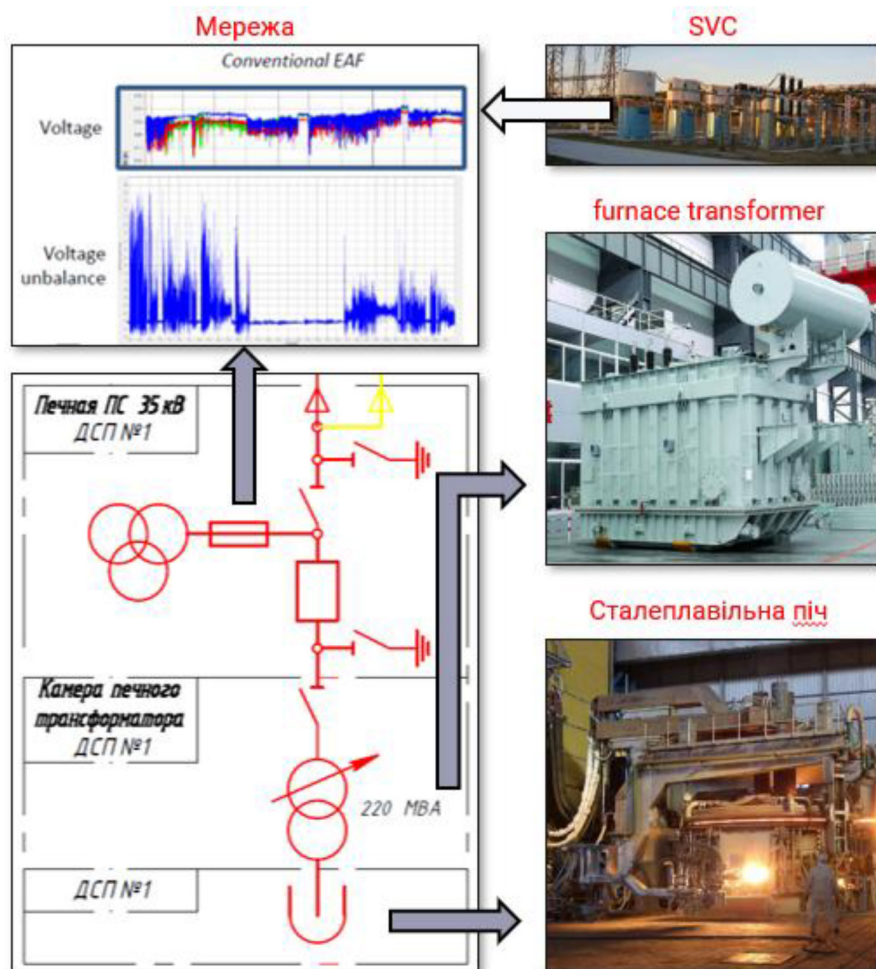


Рис. 1. Класична схема електропостачання ДСП

спотворення основних електричних параметрів під час використання електросталеплавильного обладнання.

Актуальність проблеми. Негативний вплив на якість електричної енергії чинять споживачі з нелінійними характеристиками (електродугові печі, приводи з перетворювачами частоти, пристрої плавного пуску тощо), у яких протікають несинусоїдальні струми, що спотворюють напругу. Такий вплив на мережеву напругу, спричинений під'єднанням нелінійних навантажень, називається гармонійним впливом на систему електропостачання. Ідеться про спотворення форми і, як наслідок, гармонійного складу напруги не тільки на затискачах обладнання, а й фактично всієї системи електропостачання, від якої такі установки отримують електроенергію. Тобто негативного впливу зазнає також електроустаткування, що розташоване «далеко» від джерела спотворень.

До найвагоміших негативних наслідків несиметрії та несинусоїдальності напруги слід зарахувати: додаткове нагрівання обладнання, вихід з ладу батарей статичних конденсаторів, скорочення термінів експлуатації електроустаткування, додаткові втрати електроенергії,

нестабільність роботи захисної апаратури та систем обліку, пришвидшене старіння ізоляції, складність у роботі систем автоматизації, перегрів нульових провідників тощо.

Відповідно, світова практика спирається на різні варіанти розв'язання проблем негативного впливу потужного нелінійного навантаження на систему електрозабезпечення:

1. Раціональна побудова схеми електричної мережі підприємства, яка дасть змогу зменшити впливи вищих гармонік на мережу.
2. Застосування багатообмоткових трансформаторів з розщепленою вторинною обмоткою (12- та 18-пульсні схеми) живлення перетворювачів частоти.
3. Використання пасивних фільтрів гармонік.
4. Використання активних фільтрів гармонік.

Саме тому під час застосування пічних трансформаторів (для ДСП, УКП) у класичному варіанті застосовують ФКП, що становить собою спеціально розраховану під конкретні умови систему реакторів і конденсаторів, які керуються в режимі реального часу силовим керованим ключем, чим згладжують несинусоїдальність напруги живлення та підвищують коефіцієнт потужності (рис. 2). Тобто застосування

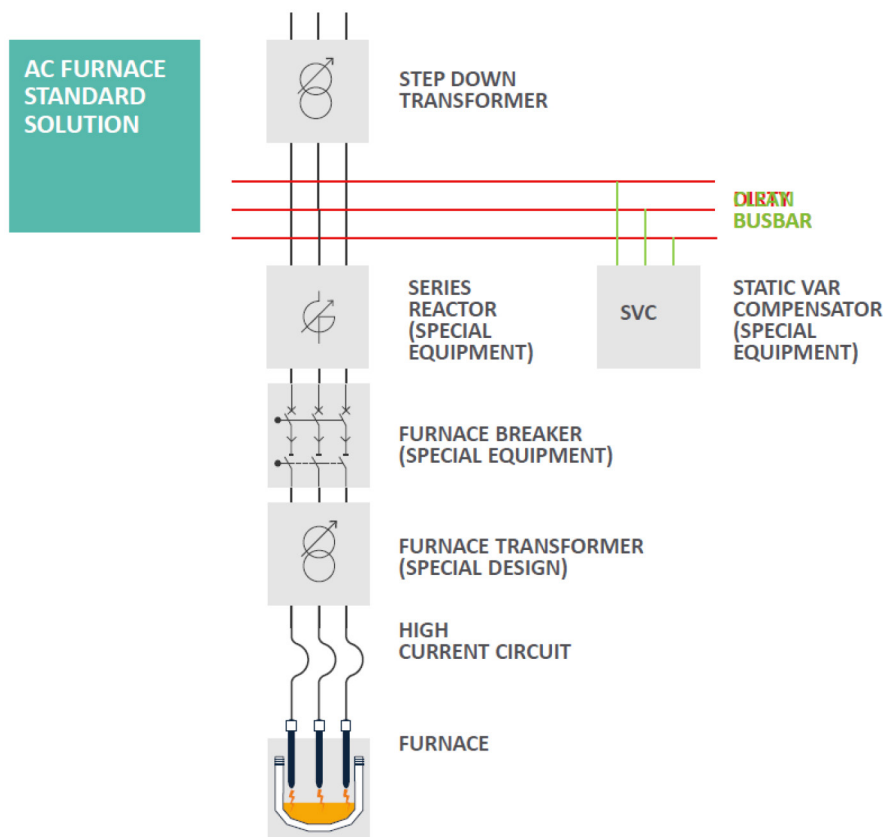


Рис. 2. Приклад побудови класичної електромережі для живлення печі з використанням дугового трансформатора та ФКП [4]

ФКП мінімізує негативний вплив роботи пічного трансформатора й допомагає утримати електричні параметри живильної мережі в допустимих межах якості електричної енергії, установлених у [2; 3].

Однак такий підхід дає змогу боротися з наслідками проблеми, а не з причиною її виникнення.

Результати. У 2016 році компанія Danieli Automation запустила своє перше принципово нове запатентоване технічне рішення для підтримки ефективної роботи електросталеплавильного устаткування – систему Q-One. Результати роботи цієї системи, установлені в плавильному цеху металургійного заводу ABS Sisak по спеціальній сталі (Хорватія), наведені у вигляді графіків основних електричних параметрів, підтвердили збільшення доступності активної потужності та ефективності ДСП.

За інформацією виробника, технологія Q-One забезпечує найбільш стабільний ефект з низьким рівнем перешкод (флікер та коефіцієнт потужності) в електричній мережі разом із найсучаснішою, динамічною, швидкою системою керування електродами, що значно подовжує їх ресурс. Результат – модернізація 78-тонної електросталеплавильної установки на заводі ABS Sisak призвела до зниження витрати електродів на 20 % і скорочення часу ввімкнення на 10 %. Окрім цього, досягнуто дуже низького рівня коливань завдяки швидкому контролю напруги та струму, а також коефіцієнта потужності, значення якого постійно перевищує 0,96.

Компанію Danieli Automation представлено низку референцій уже впроваджених систем Q-One і таких, які ще перебувають на стадії інжинірингу для майбутніх проєктів. Зазначається, що технологія Danieli Digimelter є революційним плавильним інструментом і відкриває нову еру у виробництві сталі [4–6].

Загалом, система Q-One від Danieli дає змогу відмовитися від класичної системи роботи електросталеплавильної печі із застосуванням пічного трансформатора та ФКП. Замість цього пропонується використовувати спеціальний перетворювач та перетворювальний трансформатор, що живить його. Зі свого боку, перетворювач містить такі компоненти: діодний випрямляч – ланка постійного струму – керований IGBT інвертор. Останній формує синусоїду живильної напруги заданої форми (необхідної якості), а ланка постійного струму відокремлює живильну мережу від технологічного обладнання. Для наочного розуміння основні елементи системи Q-One представлено на рис. 3, а, б.

Як бачимо, застосування системи Q-One дає змогу відмовитися від цілої низки обладнання: послідовний реактор, пічний трансформатор, ФКП, вимикач навантаження. Однак, зі свого боку, потребуватиме застосування спеціальних перетворювачів (модулів Q-One), перетворювальних трансформаторів під кожен модуль, високовольтного вимикача під кожен трансформатор, силового роз'єднувача перед електродами.

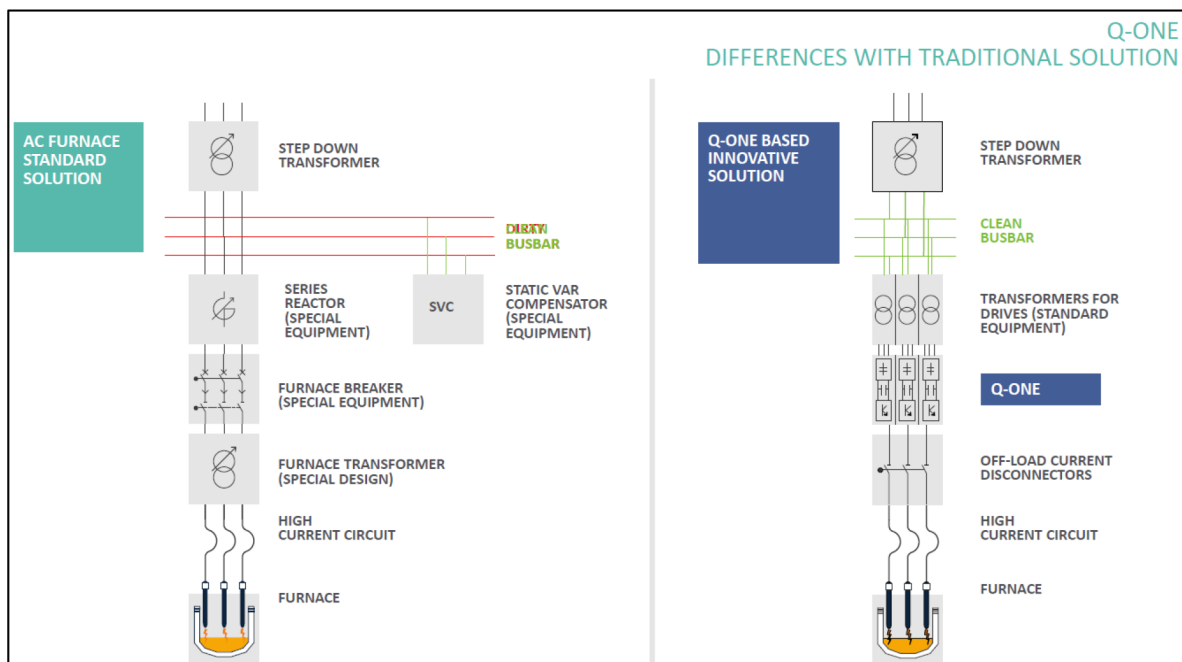
Потужність одного силового модуля перетворювача становить орієнтовно 18 МВА. Для того щоб набрати необхідну потужність установки, необхідно застосувати пропорційну кількість паралельно під'єднаних модулів. Також виробник рекомендує мати в наявності резервні модулі до 20 % номінальної потужності установки. Наприклад: 10 модулів $\times$ 18 МВА = 180 МВА + 20 % резерву ($2 \times 18 = 36$ МВА). Резервний модуль (гарячий резерв) вводиться замість робочого, що вийшов з ладу, і дає змогу продовжити роботу без зниження продуктивності установки. На сьогодні компанія Danieli пропонує системи одиничною потужністю до 200 МВА. Наприклад, проєкт Algoma Steel містить дві ДСП на 250 тонн сталі кожна та дві системи Q-One потужністю понад 190 МВА кожна [7].

Завдяки наявності ланки постійного струму DC-Link система Q-One дає можливість напряму інтегрувати додаткові альтернативні джерела енергії (за потреби), як-от сонячні та вітрові станції та установки з акумулювання енергії для усереднення добового споживання. Це актуально в умовах значних дефіцитів електричної енергії в Україні та зміни вектора на використання відновлюваних джерел та систем накопичення енергії (рис. 4).

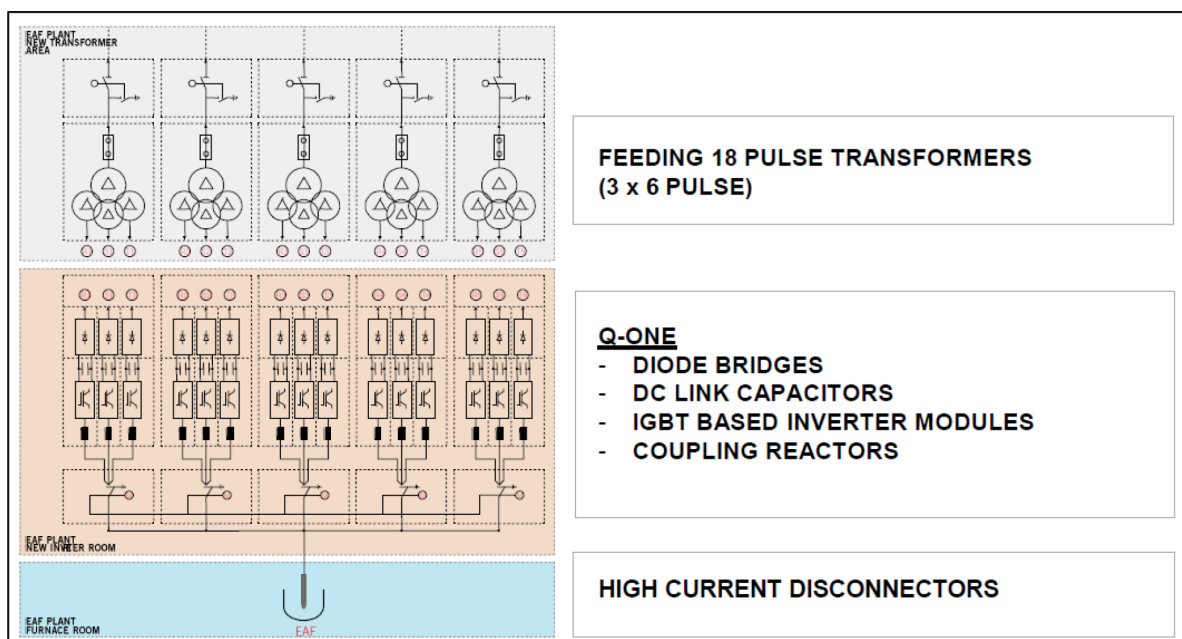
Переваги та недоліки. Будь-яка нова технічна система (а для умов України Q-One є саме такою) має свої переваги та недоліки і, звісно, не може розглядатися виключно з позитивної боку, як це презентує виробник обладнання. У кожному конкретному випадку слід урахувувати специфічні та унікальні умови впровадження системи й застосовувати зважений вибір.

Якщо говорити про переваги системи Q-One від Danieli Automation, то слід відзначити такі:

- на відміну від класичної схеми з пічним трансформатором і ФКП, система Q-One бореться не з наслідками проблеми якості електроенергії, а з її джерелом, реалізуючи політику «чистої шини живлення» в процесі експлуатації устаткування. Це також стосується режиму споживання реактивної потужності;
- надійність системи можна легко та значно підвищити, додаючи відсоток гарячого резерву



a



б

Рис. 3. Система Q-One: а – порівняння з класичною технологією електрозабезпечення дугової електропечі; б – основні елементи

(+10 %, +20 % тощо), завдяки наявності опції достатньо швидкої заміни пошкодженого перетворювального модуля. Водночас це збільшує капітальні та експлуатаційні витрати;

– завдяки наявності в архітектурі системи Q-One ланки постійного струму, вона дає змогу одразу або пізніше інтегрувати в неї альтернативні джерела енергії (сонячні або вітрові станції) та системи накопичення енергії, знизивши при цьому обсяг споживання із централізованої енергосистеми;

– у разі технологічної модернізації (збільшення продуктивності печі) система Q-One допускає розширення через додавання певної кількості силових паралельних модулів і трансформаторів. На сьогодні обмеження сягає потужності у 200 МВА;

– у класичному варіанті реалізації електроенергетичних проєктів, як правило, системи ФКП проєктуються та виробляються окремою компанією; дотримання гарантійних показників часто питання складне й вимагає ретельного

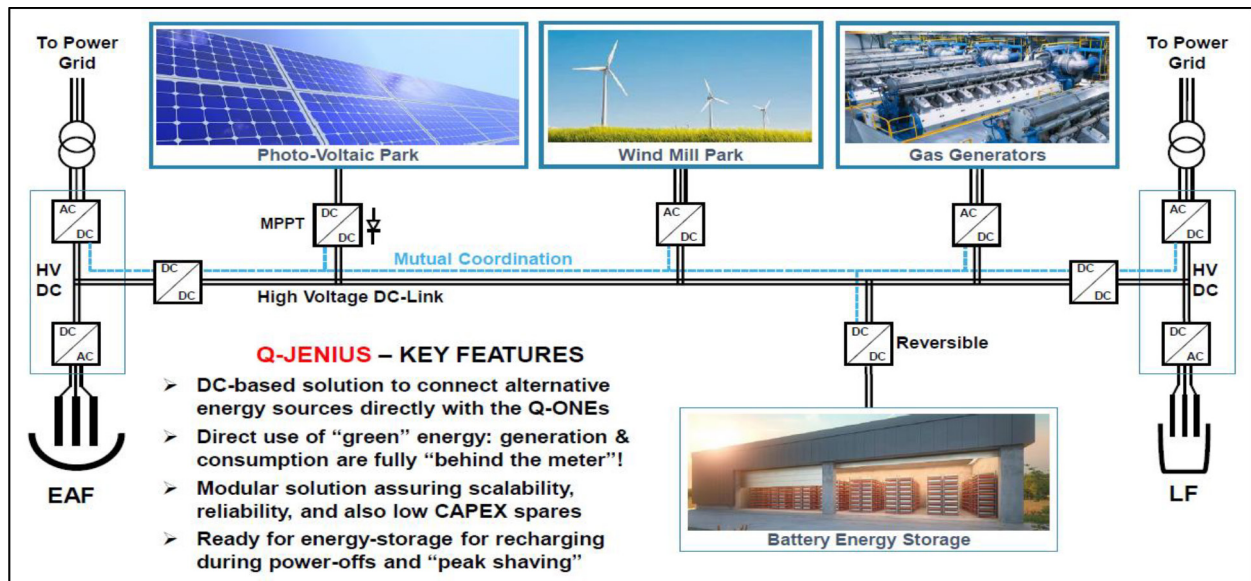


Рис. 4. Ланка постійного струму Q-One значно розширює можливості системи електрозабезпечення

опрацювання, а коректний вибір ФКП вимагає досить складного розрахунку. Тож використання системи Q-One фокусує інжиніринг усієї системи електрозабезпечення в одних руках;

– за порівняних капітальних витрат із класичною системою (зі слів виробника) технологія Q-One завдяки забезпеченню більш високих показників якості електроенергії має нижчі операційні витрати. Цьому фактору також сприяє збільшення технологічного ресурсу пічних нагрівальних електродів.

До основних недоліків, на думку авторів, варто зарахувати такі:

– компанія Danieli наразі має досить обмежений досвід фактичного впровадження системи Q-One, тому нині є обмежений обсяг результатів практичних досліджень, що можуть підтвердити задекларовані виробником переваги, особливо в частині значного покращення показників якості електроенергії. Певна кількість проєктів перебувають зараз на стадії інжинірингу;

– надійність системи Q-One порівняна або навіть нижча за класичну з пічним трансформатором і ФКП. Це пояснюється більшою кількістю паралельно під'єданого складного устаткування, особливо безпосередньо потужних перетворювальних модулів на базі силової електроніки. Вихід з ладу елементів системи Q-One зупинить технологічне устаткування на певний час, як мінімум на період заміни модулів. У класичній системі вихід з ладу ФКП дасть змогу ДСП працювати, але з погіршеними показниками. Пічний трансформатор та інші головні елементи класичної схеми – технологічно менш складне та більш надійне електрообладнання;

– виробник системи Q-One не дає 100 % гарантії відмови від ФКП під час використання його обладнання (принаймні наразі), що, на думку авторів, пов'язане з першим недоліком. Окрім цього, треба врахувати, що негативний вплив вищих гармонік більш сильний у «слабких» системах електропостачання, які характеризуються меншою потужністю короткого замикання. Тобто рівень окремих гармонік (наприклад, 17-ї та 19-ї за 18-пульсної схеми керування) буде різний при застосуванні одного набору обладнання Q-One в різних електроенергетичних системах. Нагадуємо, що, окрім загального коефіцієнта несинусоїдальності напруги (т. зв. THD), нормативні документи обмежують рівні всіх інших вищих гармонік. Саме тому виробник робить примітку, що зазвичай ФКП не потрібен, однак якщо він буде необхідний, то меншої потужності та вартості;

– застосування системи Q-One потребуватиме виділення значно більшого за площею місця під її установку в безпосередній близькості до печі (в умовах вельми стисненого простору), тоді як використання класичної схеми дає змогу розмістити ФКП ближче до головної підстанції, де дефіцит вільного простору відсутній;

– застосування системи Q-One потребує підвищених вимог до пічного розподільчого пристрою. Замість однієї комірки для класичної системи, буде потрібно до 12 для пропонованої (за максимальної потужності). Це значно підвищує витрати та знижує надійність розподільчого пристрою;

– обидві системи електрозабезпечення вимагають води для охолодження. До того ж

у технології Q-One вимоги до води підвищені як за якістю, так і за об'ємом;

– для запуску, експлуатації та подальшого обслуговування системи Q-One необхідно виконати підвищені вимоги до персоналу, оскільки класична схема більш поширена та звична для експлуатувального персоналу, особливо в Україні.

Висновки. Для живлення електросталеплавильних печей УКП і ДСП замість класичної моделі з використанням пічного трансформатора та ФКП компанія Danieli запропонувала впровадити свою запатентовану розробку – систему Q-One, щоб знизити негативний вплив роботи обладнання на електричну мережу й підвищити ефективність роботи всієї технологічної системи.

Технологія Q-One, на відміну від класичної системи з пічним трансформатором та ФКП, має головну перевагу – вона бореться з джерелом проблеми неякісної електричної енергії, а не з її наслідками. Також до позитивних особливостей можна зарахувати її гнучкість та ефективність для розширення, включно із

запасом по резерву, здатність безпосередньо інтегрувати відновлювані джерела, знижуючи цим залежність від централізованої енергосистеми.

Водночас не можна не відзначити низку істотних недоліків запропонованої системи, а саме: фактично відсутній досвід запуску та експлуатації достатньої кількості потужних систем і зниження надійності системи завдяки заміні більш простого устаткування (пічного трансформатора) на високотехнологічне (напівпровідниковий перетворювач і перетворювальний трансформатор).

З огляду на вищесказане, можна констатувати, що технологія Q-One від Danieli має певні переваги над класичною системою з використанням пічного трансформатора та ФКП і, безумовно, заслуговує на подальше впровадження та вивчення. Однак через низку недоліків і насамперед недостатньо широкий досвід її впровадження та експлуатації автори рекомендують критично оцінювати потенційні переваги роботи системи для умов конкретних металургійних підприємств України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гасик М.І. Електрометалургія. Енциклопедія Сучасної України. Редкол. : І.М.Дзюба, А.І.Жуковський, М.Г.Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2009. URL: <https://esu.com.ua/article-17753>
2. ДСТУ EN 50160-2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). [Чинний від 08.12.2023]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 32 с.
3. ГОСТ-13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. [Чинний від 01.01.1999]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837
4. Enrico Plazzogna. Sustainable Danieli Digimelter Technology Featuring Q-One for Lower Power and Electrode Consumption. URL: https://www.seaisi.org/storage/event_agendas/yH3M8DWVQIdmrUaJoABgjDjwWM81bjTmq2QbzFkx.pdf
5. Danieli Digimelter: The Revolutionary System to Melt Steel, Powered by Q-One. URL: https://www.danieli.com/en/news-media/news/danieli-digimelter-revolutionary-system-melt-steel-powered-q-one_37_476.htm
6. Another Q-One Power Feeder to Japan. URL: https://www.danieli.com/en/news-media/news/another-Q-One-power-feeder-japan_37_848.htm
7. Algoma Steel Selects Danieli Digimelter for Full Transition from Integrated to Electrical Steelmaking. URL: https://www.danieli.com/en/news-media/news/algoma-steel-selects-danieli-digimelter-full-transition-integrated-electrical-steelmaking_37_683.htm#newsfold

REFERENCES:

1. Hasyk, M.I. (2009). Elektrometalurhiia [Electrometallurgy]. *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy – Encyclopaedia of Modern Ukraine*. Redkol.: I. M. Dziuba, A. I. Zhukovskiy, M. H. Zhelezniak [ta in.]; NAN Ukrainy, NTSh. K. : Instytut entsyklopedychnykh doslidzhen NAN Ukrainy. Retrieved from: <https://esu.com.ua/article-17753> [in Ukrainian].
2. DSTU EN 50160-2023. Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachenosti (EN 50160:2022, IDT) [Characteristics of power supply voltage in general-purpose electrical networks]. [Chynnyi vid 08.12.2023]. Vyd. ofits. Kyiv: DP "UkrNDNTs", 2023. 32 s. [in Ukrainian].
3. HOST-13109-97. Elektrychna enerhiia. Sumisnist tekhnichnykh zasobiv elektromahnitna. Normy yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia [Power energy.

Electromagnetic compatibility of technical devices. Electricity quality standards in general-purpose power supply systems]. [Chynnyi vid 01.01.1999]. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837

4. Enrico Plazzogna. Sustainable Danieli Digimelter Technology Featuring Q-One for Lower Power and Electrode Consumption. Retrieved from: https://www.seaisi.org/storage/event_agendas/yH3M8DWVQIdmrUaJoABgjDjwWM81bjTmq2QbzFkx.pdf

5. Danieli Digimelter: The Revolutionary System to Melt Steel, Powered by Q-One. Retrieved from: https://www.danieli.com/en/news-media/news/danieli-digimelter-revolutionary-system-melt-steel-powered-q-one_37_476.htm

6. Another Q-One Power Feeder to Japan. Retrieved from: https://www.danieli.com/en/news-media/news/another-Q-One-power-feeder-japan_37_848.htm

7. Algoma Steel Selects Danieli Digimelter for Full Transition from Integrated to Electrical Steelmaking. Retrieved from: https://www.danieli.com/en/news-media/news/algoma-steel-selects-danieli-digimelter-full-transition-integrated-electrical-steelmaking_37_683.htm#newsfold