

Використання перетворювачів сталий струм – стала напруга для ефективного зниження коливань напруги у мережах живлення дугових сталеплавильних печей

В. Г. Турковський, А. А. Маліновський, А. З. Музичак, О. В. Турковський

Дугові сталеплавильні печі змінного струму (EAF) є одними з найпоширеніших технологічних агрегатів для отримання високоякісної сталі. Використання печей має перспективу й надалі, позаяк темпи виробництва електросталі зростають. Ці печі є потужними електричними установками з динамічним, несиметричним й нелінійним навантаженням, що негативно впливає на показники якості електроенергії мережі живлення. Традиційно цей негативний вплив знижують живленням EAF від енергосистем великої потужності або, у більшості випадків, використанням різних типів статичних компенсаторів реактивної потужності. Такі підходи потребують значного інвестування у розвиток енергосистеми або у обладнання компенсуючих установок, встановлена потужність яких у декілька разів перевищує потужність пічного трансформатора.

Ці підходи є скеровані на зниження наслідків негативного впливу. Більший ефект обмеження негативного впливу з меншими інвестиціями може дати альтернативний підхід, який спрямований безпосередньо на джерело негативного впливу. Реалізація підходу полягає у формуванні зовнішньої характеристики джерела живлення EAF. Характеристика повинна бути жорсткою за струмом у області робочих для печі режимів від експлуатаційного короткого замикання до номінального навантаження. У області режимів від номінального навантаження до неробочого ходу ця характеристика повинна бути жорсткою за напругою. Основою формування такої характеристики може бути резонансний перетворювач, який забезпечує практично стале значення струму дуги у робочих режимах печі.

Дослідженнями доведено суттєві переваги запропонованого підходу, який ефективніше покращує якість електроенергії у мережі. Це дає можливість використовувати EAF у енергосистемах меншої потужності й забезпечувати розвиток галузі з меншими інвестиціями.

Ключові слова: зниження дози флікера, коливання напруги, якість електроенергії, дугова сталеплавильна піч.

1. Вступ

Більшості приймачів електричної енергії властивий діапазон нормальних робочих режимів у інтервалі від неробочого ходу до номінального навантаження. Приєднання таких установок до мережі живлення, напруга якої підтримується практично сталою $U=\text{const}$, забезпечує їх високі показники роботи та електромагнітну сумісність з мережею.

Електродугові установки, зокрема ЕАФ, утворюють іншу групу електричних навантажень, яким властивий діапазон нормальних робочих режимів від експлуатаційного короткого замикання до номінального навантаження. Для таких установок більш природною є система живлення $I=\text{const}$. З метою певної адаптації таких електроприймачів до традиційної мережі живлення $U=\text{const}$ здійснюють певне обмеження струмів експлуатаційних коротких замикань до 1,8–2,5 в.о. Таким шляхом для малопотужних установок у певній мірі вирішується питання електромагнітної сумісності в умовах динамічного навантаження, однак показники їх роботи та експлуатаційні характеристики погіршуються. Зокрема, мають місце підвищені втрати потужності, ускладнене регулювання потужності дуги, потреба глибокого регулювання напруги пічного трансформатора та підвищені динамічні зусилля на струмовідні частини.

Однак для дугових печей великої потужності такий шлях не дозволяє забезпечити їх електромагнітну сумісність, а тому використання таких печей потребує засобів для підвищення показників якості електроенергії. Зауважимо, що вказані засоби не впливають на динаміку зміни струмів печі й спосіб регулювання потужності дуги.

Запропоновано сформувати для джерела живлення ЕАФ зовнішню характеристику з ділянками $I=\text{const}$ та $U=\text{const}$. Ділянка $I=\text{const}$ використовується у діапазоні робочих режимів від експлуатаційного короткого замикання до номінального навантаження, а ділянка $U=\text{const}$ – для режимів від номінального навантаження до неробочого ходу.

Наведено результати досліджень традиційної схеми електропостачання печей (CSC) та схеми з використанням перетворювача "сталій струм – стала напруга" (CC-CVC). Порівняльний аналіз динамічних режимів цих схем проведено в однакових умовах за лінійної симетричної постановки задачі.

Актуальність результатів дослідження полягає у обґунтуванні можливості приєднання печей до систем меншої потужності та зниження витрат коштів на розвиток енергосистеми або на компенсувальне обладнання. Така пропозиція також має позитивний вплив на особливості роботи власне пічної установки. Зокрема, це зменшення втрат потужності у вторинному контурі пічної установки та рівномірне завантаження фаз у робочих режимах. З'являється також можливість плавного регулювання потужності дуги у широкому діапазоні без перемикання ступенів напруги. Це може спростити виконання регулятора напруги на пічному трансформаторі або й повністю відмовитись від нього. Незмінність струму у режимах навантаження та експлуатаційних коротких замикань приводить до зменшення динамічних зусиль на обладнання пічної установки й дозволяє спростити конструкцію елементів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дугові сталеплавильні печі змінного струму є особливим навантаженням електроенергетичних систем, яке є одночасно динамічним, несиметричним й нелінійним. Як наслідок, ці печі негативно впливають на якість електроенергії у вузлах їх приєднання. У роботі [1] розглянуто основні фактори, що впливають на короточасну дозу флікера, та умови, за яких ця доза може пе-

ревищити допустимі значення у 5 або й 10 разів. Дана також оцінка зниження дози флікера застосуванням компенсувальних установок. На основі експериментальних досліджень у роботі [2] підтверджено перевищення допустимого значення кратності розмаху зміни напруги у 6,2 рази та показано, що ймовірність перевищення цієї величини є малою.

Нерегулярне мінливе навантаження дугових печей є типовим джерелом інтергармонік [3]. Змінна в часі та нелінійна поведінка дуги породжує спектр струму з декількома спектральними компонентами, включаючи не лише гармоніки, а й інтергармоніки. Оскільки поведінка дуги є хаотичною, то піч генерує інтергармоніки з постійно змінюваними хаотичними частотами. За даними [4] ЕАФ є потужним джерелом широкого спектру гармонік та інтергармонік, причому рівні інтергармонік можуть досягати 10 % струму основної частоти. Спектр інтергармонік для печі місткістю 100 тон знаходиться у діапазоні частот 0,01–2,0 Гц, а їх енергія складає біля 20 % усієї енергії змішаного спектру [5]. Дослідження [6] показали наявність спектру інтергармонік на частотах вище 200 Гц, а також постійної складової у струмі дуги, значення якої корелюється з номінальним струмом намагнічування пічного трансформатора. Широкий спектр вищих гармонік отриманий у дослідженні [7]; результати дослідження показують наявність окремих гармонік струму печі зі значенням 12 % та постійної складової – 3 % від номінального струму печі.

У роботі [8] дана характеристика дугової печі як особливого неперервно змінюваного навантаження, у якого відсутні два ідентичні за формою періоди струму. Внаслідок цього печі спричиняють несиметричне навантаження фаз та генерування вищих гармонік у мережу енергосистеми. З метою зниження нерівномірності завантаження фаз дугових печей у [9] запропоновані критерії оцінки асиметрії електричного кола печі. Їх використання дає одноріднішу оцінку параметрам кола та дозволяє вдосконалити балансування несиметричних режимів.

Результати великомасштабного дослідження стану якості електроенергії на металургійних підприємствах країни [10] встановили її невідповідність у багатьох випадках вимогам стандарту. Показано, що загальноприйнята практика використання компенсувальних систем не дозволяє вирішити проблему мерехтіння у спільних з енергосистемою вузлах приєднання.

Експериментальний аналіз ЕАФ місткістю 100 т з пічним трансформатором 75 МВА показав наявність накидів активної та реактивної потужності під час розплавлення брухту [11]. Це викликає коливання та несиметрію напруги у мережі. Встановлено також, що піч має низький коефіцієнт потужності у межах 0,7–0,8.

За результатами вимірювання показників якості електроенергії та модельних випробувань у роботі [12] автори підтвердили, що основним негативним наслідком роботи дугових печей є коливання напруги. Належна якість електроенергії у мережі може бути забезпечена за співвідношення між потужністю короткого замикання енергосистеми та потужністю короткого замикання завантаженої печі на рівні 120–130. Проблема спотворення напруги у мережі з дуговою електропеччю може бути вирішена за допомогою фільтрів вищих гармонік, налаштованих на відповідні частоти [13] з врахуванням частотних характеристик енергосистеми у спільній точці приєднання.

Для аналізу якості електроенергії у мережі живлення дугової печі використовуються статистичні підходи. У [14] наведено результати аналізу вищих гармонік, інтергармонік, несиметрії та флікеру, що описані як значення кумулятивної функції ймовірності (CPF), що не перевищуються з ймовірністю 99 %, 95 %, 90 % і 50 %.

Зниження коливань напруги може бути досягнуто з допомогою різних типів статичних компенсаторів реактивної потужності. За експериментальними даними [15] значення короткочасної дози флікера знижується з 4–6 % до 2,5–3 %. За відсутності компенсувальних засобів якості електроенергії, за даними експериментальних досліджень [16, 17], не відповідає вимогам. Перевищення допустимого значення флікера у 10 разів та недопустимі значення коефіцієнта спотворення струму можуть мати місце за недостатньої потужності енергосистеми [18].

За даними [19], використання статичного синхронного компенсатора (STATCOM) може забезпечити зменшення короткочасної дози флікера у 5 разів за умови належного врахування імпедансу мережі та його змін. Порівняння різних варіантів виконання STATCOM, наведене у [20], показало: 12-пульсний STATCOM з RLC-фільтром може зменшити мерехтіння напруги, спричинене нелінійними навантаженнями електродугових печей. Порівняння різних варіантів виконання STATCOM проведено також у роботі [21]. На думку авторів 6-пульсний STATCOM зменшує флікер напруги на 50 %, а 12-пульсний може усунути мерехтіння напруги та забезпечити мінімальний коефіцієнт спотворення.

Основні негативні наслідки впливу на енергосистему нестационарного навантаження печі пов'язані зі зміною модуля напруги [22] та оцінюються відповідним показником – дозою флікера. Ступінь впливу залежить від потужності короткого замикання енергосистеми у спільній точці приєднання [23]. Питання виникнення флікера, його суб'єктивне сприйняття, можливі наслідки та шляхи зменшення детально розглянуті у [24]. Основна увага у роботі приділена використанню різних варіантів компенсувальних пристроїв. Порівняльний аналіз технологій компенсації реактивної потужності, а саме з використанням синхронного конденсатора (Synchronous Condenser), статичного компенсатора змінної напруги (SVC) та статичного синхронного компенсатора й оцінка області їх використання виконано у [25]. Широкий огляд традиційних та сучасних пристроїв підвищення якості електроенергії наведено у [26]. Відзначено, що устаткування для поліпшення якості електроенергії наступного покоління в основному є багатофункціональним, що забезпечує підвищену його ефективність та надійність. У роботі [27] зроблено порівняння різних пристроїв забезпечення якості енергії у вузлах енергосистеми компенсаційного типу, зокрема, розподільчий статичний компенсатор (DSTATCOM), динамічний відновлювач напруги (DVR) та наведені характеристики їх ефективності й сфера застосування.

Використання компенсаторів реактивної потужності для ЕАФ потребує встановлення додаткового устаткування, потужність якого є співмірною з потужністю пічного трансформатора. За даними [28, 29] питома вартість обладнання STATCOM становить \$300 за кВА. Таким чином, для дугової печі з пічним трансформатором 70 МВА орієнтовне значення необхідних інвестицій на компенсувальні засоби становитиме \$21 млн.

У [30] наведено опис статичного компенсатора реактивної потужності (SVC) для дугової печі з потужністю пічного трансформатора 75 МВА. Цей компенсатор був розроблений, щоб забезпечити у точці спільного приєднання на шинах 220 кВ короткочасну дозу флікера менше 1,5. Сумарна встановлена потужність елементів обладнання SVC дорівнює 270 МВА, що перевищує потужність пічного трансформатора у 3,6 рази.

У [31] показано, що використання компенсатора STATCOM дозволяє покращити якість електроенергії у мережі, зокрема, дозволяє знизити коефіцієнт спотворення напруги у мережі. Дані [32] підтверджують зниження коливань напруги з допомогою STATCOM.

Модернізацію металургійного підприємства, зумовлену збільшенням потужності дугових печей, описано у [33]. Для зниження коливань напруги був встановлений SVC потужністю 70 Мвар, який забезпечив зниження короткочасної дози флікера у 1,9 рази.

Використання статичного компенсатора реактивної потужності виконаного з одночасним застосуванням у одній установці блоків комутованих тиристорами конденсаторів (TSC) та регульованого за допомогою тиристорів реактора (TSR) розглянуто у [34]. Це забезпечує більшу гнучкість регулювання; передбачено також використання пасивних фільтрів вищих гармонік.

У публікації [35] розглядається використання статичного компенсатора STATCOM з ємнісним накопичувачем енергії у колі постійного струму. Це дозволяє здійснювати компенсацію не лише реактивної, а й активної потужності. Застосування статичного синхронного компенсатора з вдосконаленою системою управління дозволяє значно зменшити аперіодичні коливання в енергосистемі та збільшити продуктивність печі [36].

Використання послідовно увімкненого керованого реактора позитивно впливає на коливання напруги у мережі [37]. Кратність зниження короткочасної дози флікера може перевищувати 5. Оскільки регулювання напруги пічного трансформатора впливає на стабільність горіння дуги авторами [38] запропоновано здійснювати узгоджене регулювання параметрів послідовного реактора, що забезпечує оптимальний режим роботи печі. Результати дослідження режимів дугової сталеплавильної печі з послідовно увімкненим реактором та пасивними фільтрами на стороні 30 кВ наведено у [39]. Експериментально доведено, що якість електроенергії відповідає вимогам, однак у окремі періоди роботи короткочасна доза флікера може незначно перевищувати нормативне значення.

Пропонується також диференційований підхід до підвищення якості електроенергії лише для чутливих до коливань напруги споживачів [40].

Як видно з наведеного огляду, коливання напруги є основним параметром негативного впливу дугових сталеплавильних печей на мережу. Як кількісна характеристика цих коливань найчастіше використовується короткочасна доза флікера, яка враховує не лише модуль, а й частоту змін напруги мережі.

Особливістю використання статичних компенсаторів реактивної потужності є те, що їх дія скерована на усунення у мережі негативних наслідків динамічної роботи печей. Більш ефективними можуть бути заходи, дія яких скерована безпосередньо на джерело негативного впливу, тобто на зниження рівня генеруван-

ня негативного чинника [41, 42]. Це може бути реалізовано на базі індуктивно-ємнісного перетворювача з зовнішньою характеристикою типу $I=\text{const}$ [43, 44], у якого сформована ділянка характеристики $U=\text{const}$. У результаті такий перетворювач буде підтримувати сталі значення струму дуги у області режимів від короткого замикання до номінального навантаження. У діапазоні режимів від номінального навантаження до неробочого ходу сталі значення матиме напруга живлення. У результаті, споживання реактивної потужності піччю у робочих режимах буде мати незмінне значення й складова коливання напруги у мережі, обумовлена змінами реактивної потужності, буде близькою до нуля.

Під час живлення потужних споживачів складова втрат напруги від активного навантаження є на порядок меншою від складової втрат, обумовленої реактивним навантаженням. Це дозволяє очікувати зменшення втрат напруги у мережі, а відповідно й її коливань, приблизно у 10 разів. Крім того, використання СС-CVC дозволяє реалізувати режими з практично нульовим споживанням реактивної потужності від мережі [45].

Для виконання СС-CVC необхідне додаткове обладнання. Оцінка його встановленої потужності наведена у [46].

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є обґрунтування можливості ефективного зниження коливань напруги у мережі живлення дугових сталеплавильних печей за використанням перетворювача "сталій струм – стала напруга".

Для досягнення мети були поставлено таке завдання:

– визначити короткочасну дозу флікера у спільній точці приєднання для традиційної схеми живлення печі та схеми з СС-CVC й відповідні порівняльні кількісні показники.

4. Математична та MatLab Simulink модель порівнюваних схем

Кількісні показники коливань напруги одержані за допомогою цифрової математичної моделі для лінійного та симетричного навантаження в однакових умовах, тобто, для одного типу печей та однакової динаміки зміни потужності навантаження.

Традиційна схема живлення дугових сталеплавильних печей змінного струму (CSS) складається з пічного трансформатора FT та короткої мережі SC, яка з'єднує вторинну обмотку FT з власне дуговою сталеплавильною піччю EAF. Первинна обмотка FT приєднана до спільної точки РСС шин мережі енергосистеми PS (рис. 1). Для забезпечення регулювання напруги вторинної обмотки та потужності дуги FT оснащений перемикачем відгалужень на його первинній обмотці. Крім того, з метою обмеження струмів експлуатаційних коротких замикань схема оснащена реактором, увімкненим на стороні первинної обмотки.

Структурна схема живлення дугової печі з використанням СС-CVC наведена на рис. 2. Власне дугова піч EAF отримує живлення через коротку мережу SC від вторинних обмоток пічного трансформатора FT. На стороні ВН увімкнені індуктивний ІЕ та ємнісний СЕ елементи, з'єднані відповідно з первинними обмотками трансформатора та приєднані до РСС. За вибору приведених опорів

індуктивного та ємнісного елементів з умови резонансу забезпечується стаке значення струму дуги у нормальному діапазоні зміни її довжини (від експлуатаційного короткого замикання до номінального навантаження). У результаті реактивна потужність в умовах змінного навантаження теж матиме стаке значення, що забезпечить суттєве зниження коливань напруги у мережі. У аномальних режимах, від номінального навантаження до неробочого ходу, установка підтримує стаке значення напруги дуги з допомогою формувальних елементів (на структурній схемі не вказані).

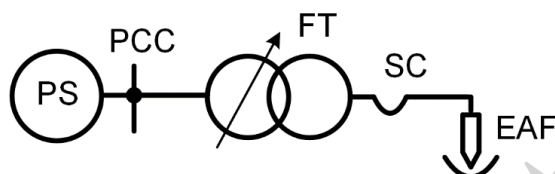


Рис. 1. Традиційна схема живлення дугової сталеплавильної печі

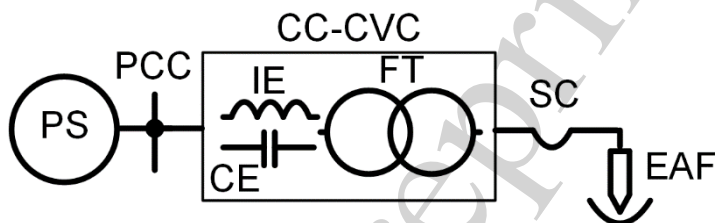


Рис. 2. Структурна схема живлення дугової печі з використанням CC-CVC

Наведені нижче результати отримані для дугової сталеплавильної печі місткістю 160 тон, оснащеної пічним трансформатором потужністю 140 МВА з напругами 35/1,3 кВ. Інші параметри електричного обладнання печі: напруга короткого замикання трансформатора – 8 %; відносні активні втрати досліду короткого замикання трансформатора – 0,8 %. Індуктивний і активний опір короткої мережі дорівнюють, відповідно, 4,75 та 0,68 мОм. З врахуванням індуктивності високовольтного реактора сумарний реактивний опір кола становить 6,23 мОм, а кратність струму експлуатаційного короткого замикання – 1,92. Еквівалентний опір дуги за номінального навантаження складає 9,62 мОм.

Для розрахунку режимів наведених схем сформована математична модель у методі контурних координат (струмів віток та поточозчеплень обмоток трансформатора, реактора). Електромагнітні процеси у наведеній схемі живлення печі у цьому методі описуються наступною системою рівнянь:

$$GMG_t \frac{d\vec{i}_k}{dt} + GRG_t \vec{i}_k + G(\vec{u}_n + \vec{u}_c) = G\vec{e};$$

$$C \frac{d\vec{u}_c}{dt} - G_t \vec{i}_k = 0, \tag{1}$$

де \vec{i}_k – вектор-стовпець контурних координат віток схеми; \vec{u}_n , \vec{u}_c , \vec{e} – вектори-стовпці відповідно напруг нелінійних елементів, напруг ємнісних елементів та ЕРС віток електричного кола; G , G_t – друга матриця інциденцій графа схеми, об'єднана для віток електричних і магнітних кіл, та її транспонована матриця; M , R – відповідно матриці власних та взаємних індуктивностей й активних опорів віток схеми, об'єднані для електричних і магнітних кіл; C – матриця ємностей віток схеми.

Для традиційної схеми живлення дугової сталеплавильної печі CSS система рівнянь (1) має 8 порядок, а для СС-CVC – 17.

Розрахунок і аналіз електромагнітних процесів, що описуються системою рівнянь (1), проводився з використанням програмного середовища MatLab Simulink.

Блочна схема MatLab Simulink моделі, що наведена на рис. 3, містить такі компоненти: блок 3 (Gt matrix) – блок формування другої матриці інциденцій графа схеми; блок 2 (Params) – блок формування вхідних даних, умов розрахунку (динамічний, несиметричний, стохастичний режими тощо); блоки 4–6 (компоненти матриць M, R, C); блок 7 (E vector) – блок складових вектора електрорушійних сил; блок 12 – задання початкових умов. Крім того схема MatLab Simulink моделі має блоки математичних операцій з матрицями (блоки 9–11), інвертування (блок 8), а також чисельного інтегрування (блок 13). У блоці Params також задаються характеристики нелінійних елементів схеми, зокрема, магнітної системи трансформатора та реактора. У блоці 1 (Cassie model) задаються лінійна або нелінійна модель дуги (Cassie модель чи інша). Блок Results призначений для опрацювання отриманих результатів, тобто розрахунку діючих і середньоквадратичних значень, симетричних та гармонічних складових показників режиму й їх ймовірнісних характеристик.

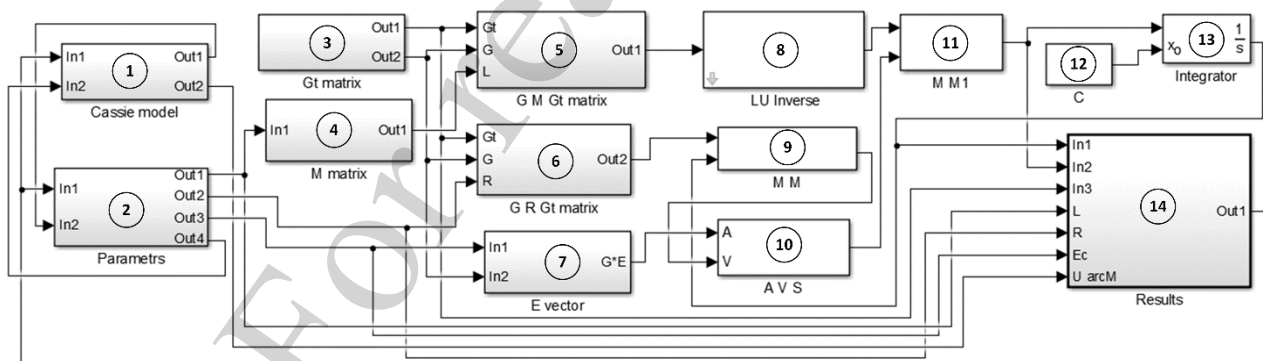


Рис. 3. Блочна схема MatLab Simulink моделі живлення дугової печі

Під час розрахунків відносна потужність короткого замикання енергосистеми S_{sc} приймалась у діапазоні 8–100 в.о. (відносних одиниць) від номінальної потужності пічного трансформатора. Відношення реактивного опору системи до активного становило 20.

Аналіз експериментальних діаграм струму дугових сталеплавильних печей різної місткості [10–18] показує значну стохастичну динаміку зміни струму дуги CSS, особливо у початковий період плавлення. Ця динаміка має певну квазіперіо-

дичність, причому граничні режими – неробочого ходу та експлуатаційного короткого замикання, за яких відсутнє виділення енергії у печі, відбуваються доволі нечасто, особливо трифазні. У роботі аналіз коливань напруги проведений для сукупності робочих динамічних режимів, у яких має місце виділення енергії дугою.

Для порівняльного аналізу показників різних варіантів схеми живлення печі прийнято, що навантаження є лінійним й симетричним. У цих умовах заступна схема електричного кола печі складається з послідовно увімкнених еквівалентного активного опору дуги та активного й реактивного опорів кола, що включають у себе опори вторинного ступопідводу та вторинних обмоток пічного трансформатора. За динамічного навантаження опір дуги є функцією часу й змінюється наступним чином:

$$R_{arc}(t) = R_{arcm} (1 + KR_v \sin 2\pi f_v t), \quad (2)$$

де $R_{arc}(t)$ – еквівалентний динамічний опір дуги; R_{arcm} – середнє значення еквівалентного опору дуги; KR_v – відносна амплітуда зміни опору дуги; f_v – частота зміни опору дуги.

5. Характеристики динамічних режимів порівнюваних схем живлення печей

5.1. Коливання напруги у схемі CSS

Отримані з допомогою Simulink моделі результати для схеми CSS в умовах динамічного навантаження наведені на рис. 4. Розрахунок виконаний для наступних вихідних даних: частота зміни навантаження – 1 Гц; відносна потужність короткого замикання енергосистеми у точці приєднання печі – 100 в.о.; середнє значення еквівалентного опору дуги – 26,4 мОм та відносна амплітуда зміни опору дуги – 0,72. Прийняте значення відносної амплітуди зміни опору дуги дозволяє отримати близький до граничного діапазон зміни еквівалентного опору навантаження, можливий на початковій стадії розплавлення шихти.

На діаграмах рис. 4 прийнято наступні позначення: U_{arc} , I_{arc} , P_{arc} , R_{arc} – відповідно напруга, струм, потужність та опір дуги; Q_{sys} – реактивна потужність системи та dU_{sys} – відхилення напруги у мережі.

Усі параметри режиму на рис. 4 наведені у відносних одиницях. За базові значення прийнято: для опору дуги – середнє його значення 26,4 мОм; для струму дуги – номінальний струм пічного трансформатора 62,25 кА; для напруги дуги – номінальна фазна напруга вторинної обмотки пічного трансформатора 750 В; для активної потужності дуги – номінальна повна потужність пічного трансформатора 140 МВА; для втрат напруги у мережі живлення – напруга значенням 100 В.

Як видно з діаграми, відповідно до зміни опору дуги періодично змінюються й інші параметри режиму. Екстремальні значення потужності дуги становлять 117 та 35,4 МВт. Розмах її зміни складає 81,6 МВт, що становить 72 % від номінальної активної її потужності печі. Це значення є близьким до граничних регулярних змін потужності печі. Реактивна потужність печі змінюється від 4,8 до 98,4 Мвар. Визначена максимальна швидкість її наростання, яка складає

562 Мвар/с. Струм дуги змінюється від 72,55 до 16,12 кА, тобто діапазон зміни є трохи меншим номінального струму печі. Напряга дуги приймає значення від 731 до 537 В й діапазон її зміни складає 25,8 % номінальної напруги вторинної обмотки пічного трансформатора. Зміна параметрів режиму печі викликає коливання напруги у мережі живлення, розмах зміни якого становить 146,1 В, тобто 0,72 % номінальної фазної напруги мережі. Допустимість таких змін може бути визначена на основі стандарту [47].

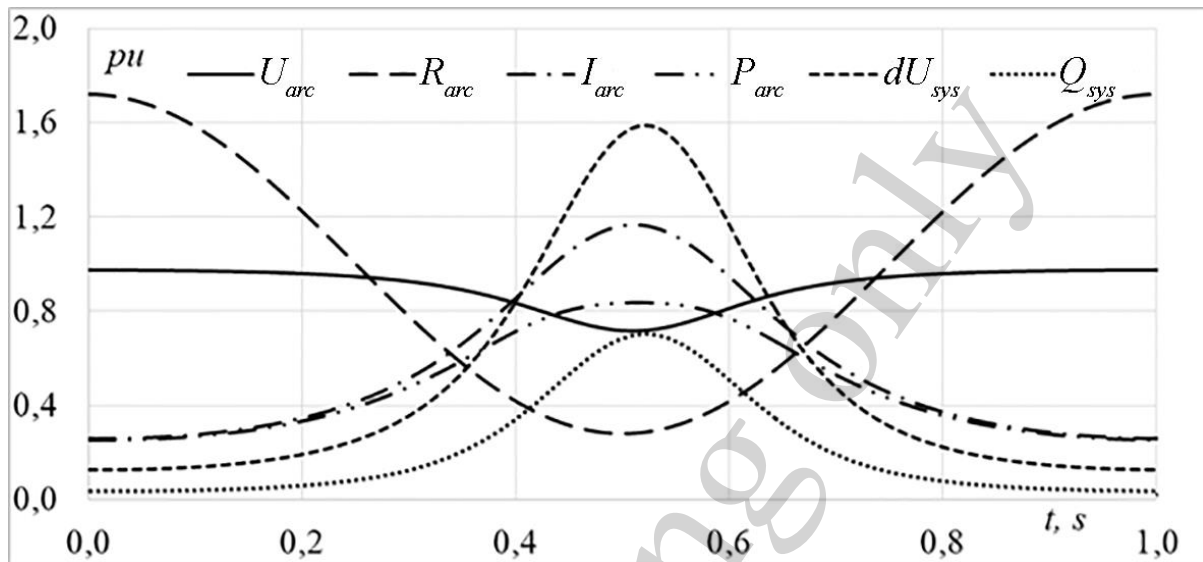


Рис. 4. Часові діаграми параметрів режиму CSS

Для оцінки ступеня негативного впливу на мережу живлення як міра цього впливу використовується доза флікера. У стандартній залежності дози короткочасного флікера P_{st} від частоти [47] допустиме значення змін оiginalної напруги синусоїдної форми з частотою 1 Гц дорівнює 1,432 %. Таким чином, доза короткочасного флікера становитиме $0,72:1,432=0,5$, тобто не перевищує допустимого значення рівного 1.

Швидкість наростання чи спадання реактивної потужності для сталої амплітуди змін буде пропорційно залежати від частоти зміни навантаження f_v . За даними [48], отриманими з експериментальних спостережень, швидкість наростання реактивної потужності дугових сталеплавильних печей оцінюється у 500 Мвар/с. Враховуючи зростання одиничної потужності сучасних печей можна вважати, що це значення може бути дещо більшим. Виходячи з цього, верхня межа частоти зміни навантаження f_v у дослідженнях була обмежена значенням 4 Гц, за якого швидкість наростання реактивної потужності перевищує 1000 Мвар/с.

Вплив частоти зміни навантаження CSS на значення короткочасної дози флікера у спільній точці для різної потужності енергосистеми відображений на рис. 5. Графіки побудовані для частот зміни f_v від 1 до 4 Гц та діапазону відносної потужності короткого замикання енергосистеми від 8 до 100 в.о.

Наведені дані показують, що у діапазоні зміни відносної потужності короткого замикання енергосистеми S_{sc} від 100 до 40 в.о. доза короткочасного флікера P_{st} зростає майже за лінійною залежністю. Для значень потужності енергосистеми від

40 до 20 в.о. темпи зростання P_{st} стають більшими, а у діапазоні 20–8 в.о. – швидкість наростання значень дози флікера досягає найбільших значень.

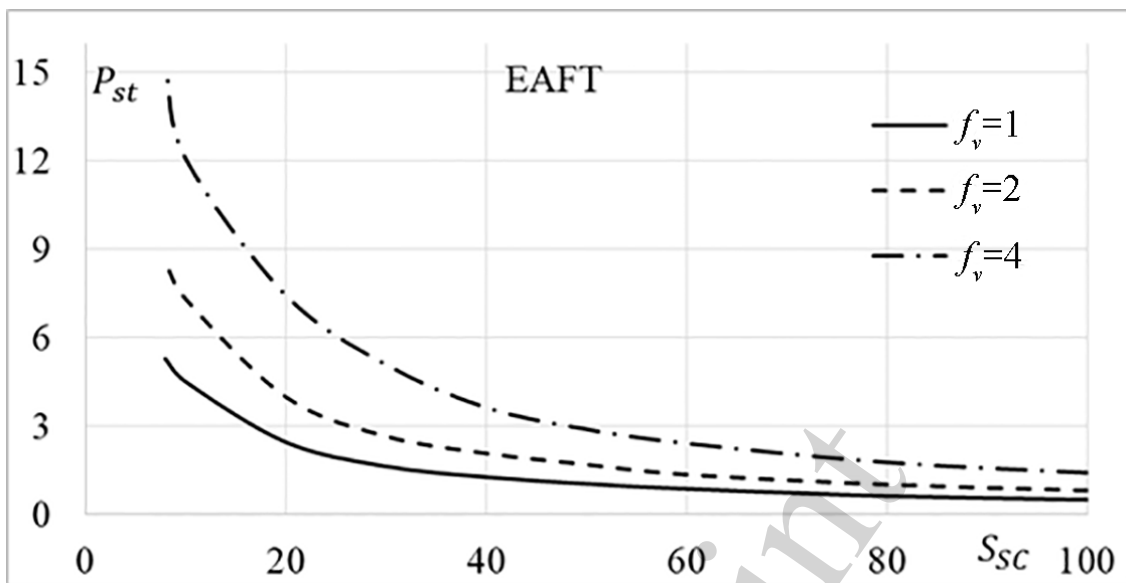


Рис. 5. Залежності короткочасної дози флікера CSS від відносної потужності енергосистеми

Частота зміни навантаження суттєво впливає на значення дози флікера й зростання частоти викликає її збільшення. За потужності енергосистеми $S_{sc}=100$ в.о. доза флікера для частот 1, 2 та 4 Гц становить, відповідно, 0,5, 0,8 та 1,42, а для $S_{sc}=8$ в.о. – відповідно 5,3, 8,6 і 15,3.

5. 2. Коливання напруги у схемі СС-CVC

Розрахунок короткочасної дози флікера для печі з перетворювачем СС-CVC проводився за змін еквівалентного опору навантаження, що відповідає рівнянню (2). Значення R_{arc} та KR_v вибирались таким чином, щоб забезпечити заданий діапазон зміни активної потужності дуги. Базове значення $R_{arc}=6,13$ мОм, а відносна амплітуда зміни навантаження $KR_v=0,65$. Максимальне значення розмаху зміни потужності дуги становило 84 МВт, що є практично таким же, як у схемі CSS. Відхилення розмаху зміни потужності дуги для порівнюваних схем живлення печі в умовах варіації змінних не перевищувало 0,5 %.

Часові діаграми зміни таких же параметрів режиму, як у попередній схемі, отримані для динамічного навантаження з допомогою Simulink моделі, наведені на рис. 6. Графіки побудовані у тій же системі відносних одиниць, що застосована для аналізу результатів CSS за виключенням значення $R_{arc}=6,13$ мОм.

З діаграм видно, що зміна активного опору дуги R_{arc} викликає відповідну зміну напруги U_{arc} та потужності дуги P_{arc} . Однак струм дуги I_{arc} , завдяки використанню СС-CVC, змінюється у вузьких межах від 63,4 до 60,2 кА, тобто є практично сталим. Як наслідок, реактивна потужність Q_{sys} , що споживається від мережі, також має майже сталі значення, оскільки змінюється від 109,1 до 97,2 Мвар.

Отримані залежності короткочасної дози флікера від потужності енергосистеми для СС-CVC наведені на рис. 7.

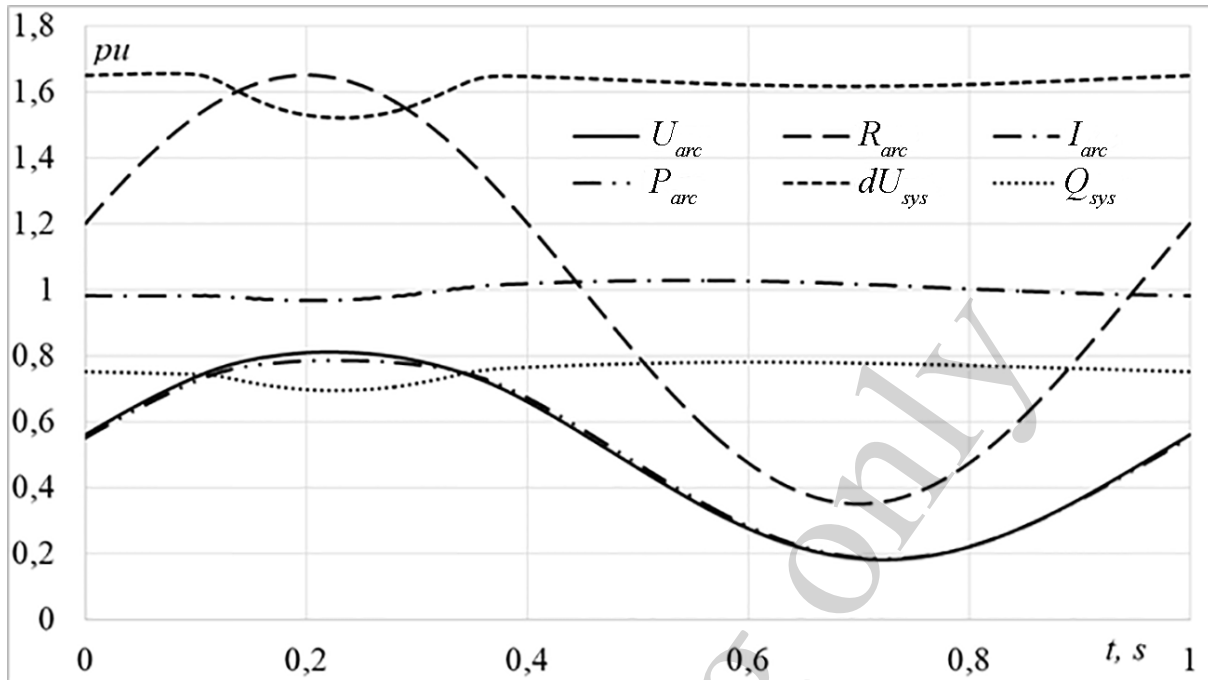


Рис. 6. Часові діаграми параметрів режиму печі з СС-CVC

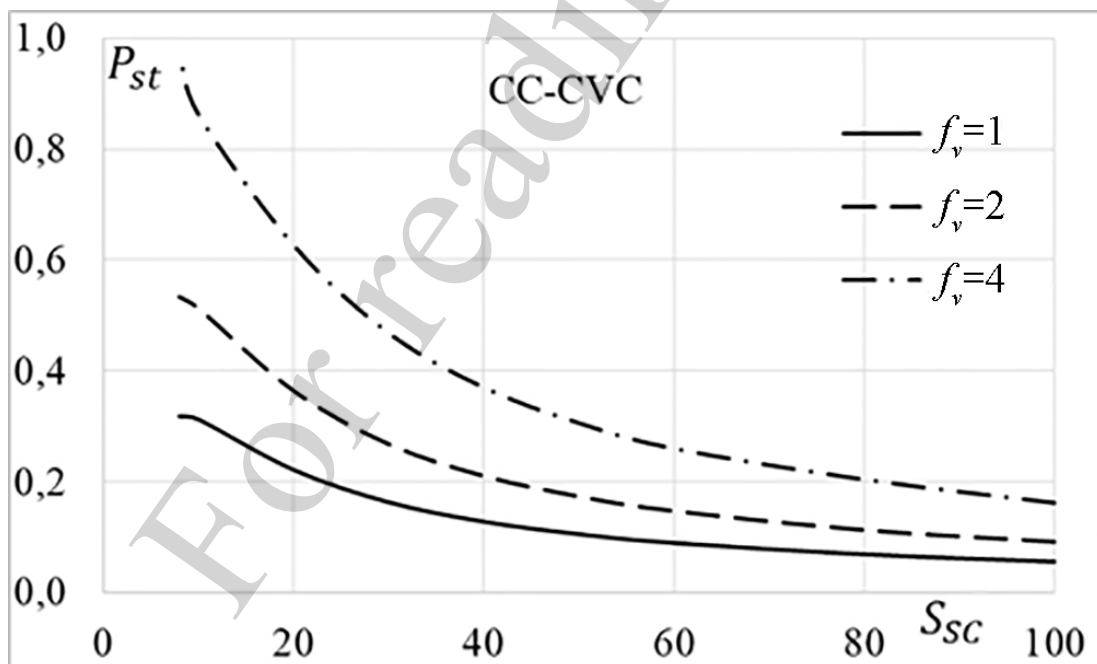


Рис. 7. Залежності короткочасної дози флікера для СС-CVC від відносної потужності енергосистеми

Як видно, для схеми СС-CVC віднозна потужність енергосистеми та частота зміни навантаження є параметрами, що суттєво впливають на значення дози флікера.

За отриманими результатами на рис. 8 побудовані залежності кратності зниження флікера KP_{st} , як відношення дози флікера у мережі за традиційною схемою живлення дугової печі CSS до значення цієї ж дози у схемі живлення з використанням СС-CVC.

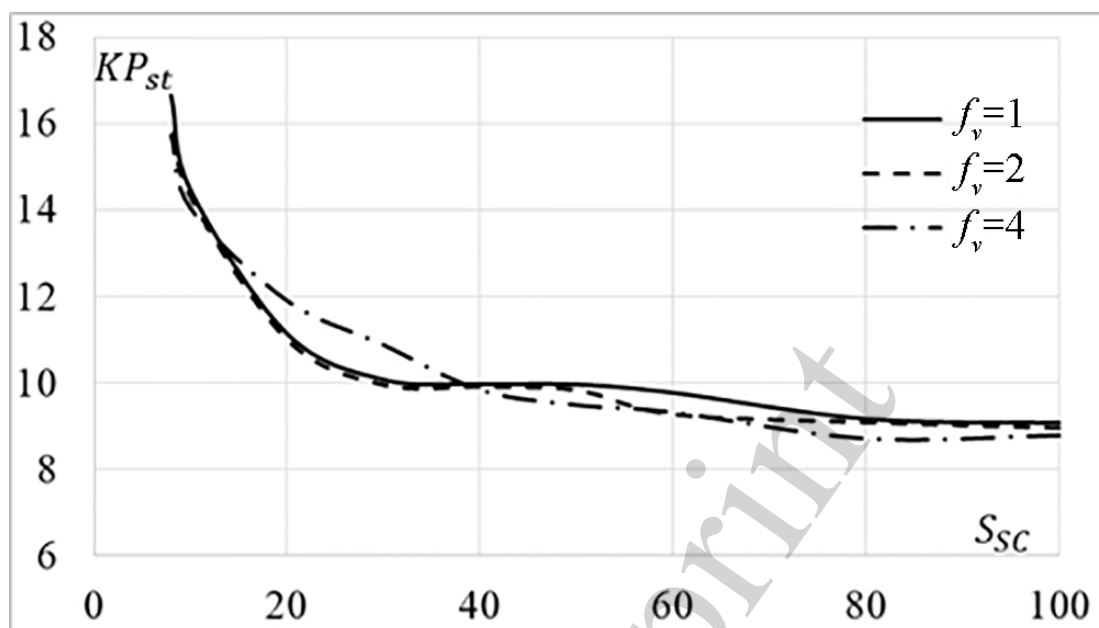


Рис. 8. Залежності кратності зменшення дози флікера від відносної потужності енергосистеми

Наведені на рис. 8 результати показують, що у діапазоні зміни відносної потужності короткого замикання енергосистеми від 100 до 30 в.о. темпи зростання KP_{st} є невеликими. Для менш потужних енергосистем зі значеннями S_{sc} меншим 20 ці темпи різко зростають.

6. Обговорення результатів дослідження коливань напруги у мережах за порівнюваних схем живлення

Дугові сталеплавильні печі змінного струму за традиційних схем їх живлення негативно впливають на усі основні показники якості електроенергії у мережі, визначальним з яких є коливання напруги. Отримані результати показали, що у початковий період плавлення у печі, коли розмах зміни активної потужності дуги є близьким до максимального значення (рис. 5), допустимі значення дози флікера можуть мати місце лише для енергосистем великої потужності. Такі системи повинні мати потужність короткого замикання у вузлі приєднання навантаження, що у 80–100 раз перевищує потужність пічного трансформатора.

Традиційний підхід до зниження коливань напруги у мережах живлення таких печей переважно передбачає використання різних варіантів виконання статичних компенсаторів реактивної потужності. Це дозволяє знизити короточасну дозу флікера у 1,5–3 рази, а за використання STATCOM – досягти 6.

Використання компенсувальних пристроїв дозволяє покращити якість електричної енергії, однак не завжди до вимог стандартів. За даними ґрунтов-

ного дослідження [10], незважаючи на те, що майже усі підприємства галузі оснащені сучасними статичними компенсаторами реактивної потужності, значення короткочасного й довготривалого флікеру на значній частині підприємств перевищують допустимі межі. Більші проблеми є у вузлах енергосистеми, від яких живляться декілька печей.

Запропонований альтернативний підхід оснований на врахуванні особливостей дугових сталеплавильних печей, яким властивий діапазон нормальних робочих режимів від експлуатаційного короткого замикання до номінального навантаження. Для таких установок більш природною є система живлення $I = \text{const}$. Використання такої системи змінює підходи до підвищення якості електроенергії у мережах з дуговими електропечами. Пропоновані заходи тепер скеровуються не на усунення наслідків негативного впливу печей, а безпосередньо на його джерело з метою зниження рівня генерування негативного чинника.

Запропоновано використати для живлення дугової печі перетворювач змінного струму з зовнішньою характеристикою виду «сталій струм – стала напруга» СС-CVC. Такий перетворювач у робочих режимах від експлуатаційного короткого замикання до номінального навантаження забезпечує практично стале значення струму дуги. У діапазоні від номінального навантаження до неробочого ходу підтримується стале значення напруги живлення.

Стабілізація струму дуги у робочих режимах забезпечує практично стале споживання реактивної потужності від мережі. За рахунок цього різко зменшується складова втрат напруги у мережі, обумовлена змінами споживання реактивної потужності.

Це підтверджується наведеними на рис. 7б діаграмами, які показують, що використання СС-CVC забезпечує допустимі стандартом значення дози флікеру в усій розглянутій області значень потужності енергосистеми та частоти зміни навантаження. Зокрема, для відносної потужності енергосистеми рівної 8 в.о. та частоті зміни навантаження 4 Гц короткочасна доза флікеру становить 0,97. За використання традиційної схеми живлення ця доза має значення 15,25.

Ефективність використання СС-CVC ілюструють діаграми, наведені на рис. 8. Кратність зниження дози флікера за рахунок використання СС-CVC знаходиться у межах 9–10 для діапазону відносної потужності короткого замикання енергосистеми від 100 до 30 в.о. Для менш потужних енергосистем зі значеннями S_{sc} від 20 до 8 в.о. ця кратність є вищою й зростає до 11–16. Ефективність використання СС-CVC у енергосистемах меншої потужності є більшою. Отримані дані підтверджують припущення щодо можливості суттєвого зменшення коливань у мережі живлення дугових сталеплавильних печей за рахунок зміни системи їх живлення.

Наведені результати дослідження отримані за лінійного симетричного навантаження зі змінами потужності, характерними для початкового періоду плавлення. Частота зміни навантаження 4 Гц обмежувалась швидкістю наростання активної потужності печі на рівні 1000 МВт/с.

Передбачається проведення подальших досліджень для несиметричного динамічного навантаження з врахуванням нелінійності вольт-амперних характеристик дуги.

Використання СС-CVC для дугових печей має й інші позитивні сторони. Зокрема, досягається зменшення втрат потужності у вторинному контурі пічної установки, оскільки за однакових середніх значень струму дуги у порівнюваних схемах, середньоквадратичне буде меншим у схемі СС-CVC. Різниця значень цих струмів залежить від періоду плавлення й знаходиться у межах 10–25 %.

Підтримання сталого значення струму дуги дає можливість плавно й у широких межах змінювати потужність печі шляхом зміни лише одного параметра – довжини дуги. Це дозволяє ставити питання щодо спрощення регулятора напруги пічного трансформатора або й відмови, у певних умовах, від його використання. У цьому випадку може бути зменшена типова потужність первинної обмотки трансформатора і знижені його габарити.

Крім того, обмеження струму вторинного контуру печі на рівні номінального значення зумовлює зниження динамічних зусиль на струмовідні елементи, що дозволить спростити їх конструктивне виконання.

7. Висновки

1. Результати дослідження динамічних режимів дугової сталеплавильної печі змінного струму перетворювачем "сталій струм – стала напруга" показали, що за його використання кратність зниження короткочасної дози флікера у вузлах енергосистеми з відносною потужністю короткого замикання у діапазоні 100 – 30 в.о., складає 9–10. Для енергосистем зі значеннями відносною потужності від 20 до 8 в.о. ця кратність зростає до 11–16. Ці показники підтверджують ефективність використання перетворювачів «сталій струм – стала напруга» для покращення якості електроенергії у мережах живлення дугових сталеплавильних печей.

Література

1. 1453-2015 - IEEE Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems. doi: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2015.7317469>
2. Рыжнев, Ю. Л., Минеев, Р. В., Михеев, А. П., Смелянский, М. Я. (1975). Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения. М.: Энергия, 185.
3. Testa, A., Akram, M. F., Burch, R., Carpinelli, G., Chang, G., Dinavahi, V. et. al. (2007). Interharmonics: Theory and Modeling. IEEE Transactions on Power Delivery, 22 (4), 2335–2348. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2007.905505>
4. Жежеленко, И. В., Шидловский, А. К., Пивняк, Г. Г., Саенко, Ю. Л., Нойбергер, Н. А. (2012). Электромагнитная совместимость потребителей. Москва: Машиностроение, 351.
5. Жежеленко, И. В., Саенко, Ю. Л., Бараненко, Т. К. (2002). Спектральный анализ тока нагрузки источников интергармоник в промышленных электрических сетях. Вісник Приазовського Державного технічного університету, 12, 194–201.
6. Yusoff, M. R., Jopri, M. H., Abdullah, A. R., Sutikno, T., Manap, M., Hussin, A. S. (2017). An Analysis of Harmonic and Interharmonic Contribution of Electric Arc Furnace by Using Periodogram. International Journal of Electrical and

Computer Engineering (IJECE), 7 (6), 3753. doi: <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.pp3753-3760>

7. Sarma, P. M., Jayaram Kumar, S. V. (2013). Electric Arc Furnace Flicker Mitigation in a Steel Plant Using a Statcom. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2 (1). 227–231. URL: http://www.ijesit.com/Volume%202/Issue%201/IJESIT201301_33.pdf

8. Howroyd, D. C. (1979). Distortion and Unbalance From Abnormal Loads on a Power System. *IFAC Proceedings Volumes*, 12 (5), 233–240. doi: [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)65310-2](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)65310-2)

9. Białek, J. Wąsowski, A. (2005). Advantages of changing 3-phase ARC furnaces asymmetry estimation criteria in international and European standards. *Electrical Power Quality and Utilisation*, 11 (1), 93–96.

10. Salor, O., Gultekin, B., Buhan, S., Boyrazoglu, B., Inan, T., Atalik, T. et al. (2007). Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry in Turkey. 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. doi: <https://doi.org/10.1109/07ias.2007.67>

11. Toma, A. I., Popa, G. N., Iagar, A., Deaconu, S. I. (2010). Experimental analysis of electric parameters of a 100 t UHP electric arc furnace. 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology. doi: <https://doi.org/10.1109/icit.2010.5472563>

12. Łukasik, Z., Olczykowski, Z. (2020). Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems. *Energies*, 13 (6), 1462. doi: <https://doi.org/10.3390/en13061462>

13. Khalik, H., Aziz, M. M. A., Farouk, E. (2011). Improvement of Power System Distribution Quality Due to Using Dc-Converter Loads and Electric Arc Furnaces. *New York Science Journal*, 4 (12), 10–19.

14. Mayordomo, J. G., Prieto, E., Hernandez, A., Beites, L. F. (2000). Arc furnace characterization from an off-line analysis of measurements. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441). doi: <https://doi.org/10.1109/ichqp.2000.896877>

15. Donsión, M. P., Oliveira, F. (2007). AC arc furnaces flicker measurement with and without a SVC system connected. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1 (05), 785–788. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj05.383>

16. Issouribehere, P. E., Issouribehere, F., Barbera, G. A. (2005). Power quality measurements and operating characteristics of electric arc furnaces. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/pes.2005.1489388>

17. Lu, C.-W., Huang, S.-J., Huang, C.-L. (2000). Flicker characteristic estimation of an AC electric arc furnace. *Electric Power Systems Research*, 54 (2), 121–130. doi: [https://doi.org/10.1016/s0378-7796\(99\)00080-2](https://doi.org/10.1016/s0378-7796(99)00080-2)

18. Nikoloski, L., Rafajlovski, G. (2000). Power quality aspects of arc steel melting furnace. A case study. 2000 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries. Proceedings. MeleCon 2000 (Cat. No.00CH37099). doi: <https://doi.org/10.1109/melcon.2000.879681>

19. Larsson, T., Poumarede, C. (1999). STATCOM, an efficient means for flicker mitigation. IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233). doi: <https://doi.org/10.1109/pesw.1999.747380>
20. Mustafa, D., Sridhar, P., Bhaskar, V., Aditya, P. (2017). Compensation of Voltage Flicker by Using Statcom and Facts Devices. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 5 (8), 122–130. URL: <https://www.ijireeice.com/upload/2017/august-17/IJIREEICE%2020.pdf>
21. Tadvika, T., Srikanth, M., Muni, T. V. (2014). THD reduction and voltage flicker mitigation in power system base on STATCOM. International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014). doi: <https://doi.org/10.1109/icices.2014.7034161>
22. Vorganti, D., Sriram, C. (2014). Implementation of SPWM Technique in D-STATCOM for Voltage Sag and Swell. International Electrical Engineering Journal (IEEJ), 5 (12), 1649–1654.
23. Couvreur, M. (2001). The concept of short-circuit power and the assessment of the flicker emission level. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2001). doi: <https://doi.org/10.1049/cp:20010765>
24. DeDad, J. (2007). Flicker: Causes, Symptoms, and Cures. Electrical Construction and Maintenance. URL: <https://www.researchgate.net/publication/298602970>
25. Igbinoia, F. O., Fandi, G., Svec, J., Muller, Z., Tlustý, J. (2015). Comparative review of reactive power compensation technologies. 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). doi: <https://doi.org/10.1109/epe.2015.7161066>
26. Naderi, Y., Hosseini, S. H., Ghassem Zadeh, S., Mohammadi-Ivatloo, B., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. (2018). An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 201–214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.013>
27. Jirange, S. N., Kinge, A. P. (2017). A Review on Power Quality Compensation Devices. International Journal of Scientific Development and Research (IJS DR), 2 (9), 29–36.
28. Shahgholian, G., Golibagh, M. (2012). Compensation for Power Quality Improvement in Electric Arc Furnace with Considering Economic Index. Majlesi Journal of Electrical Engineering, 6 (1), 62–69.
29. Chandra, B., Visali, N. (2013). Optimal Placement of SVC with Cost Effective Function Using Particle Swarm Optimization. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 1 (2), 41–45. URL: <http://warse.org/pdfs/2013/ijeter02122013.pdf>
30. Grunbaum, R., Dosi, D., Rizzani, L. (2005). SVC for maintaining of power quality in the feeding grid in conjunction with an electric arc furnace in a steel plant. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005). doi: <https://doi.org/10.1049/cp:20051037>
31. Gajjar, K., Patel, P., Rawal, D. (2017). Modelling and Simulation of STATCOM Device for Voltage Flickering Mitigation. National Conference on

Emerging Trends, Challenges & Opportunities in Power Sector. Published by IJSRD, 72–80. URL: <https://www.academia.edu/31706912>

32. VeeraRaghava, J. H. V., Sekhar, K. C. (2012). Effective Mitigation of Voltage Flicker in Power System using 12-Pulse Converter based Statcom. *International Journal of Computer Applications*, 44 (18), 22–26. doi: <https://doi.org/10.5120/6363-8458>

33. Hackl, G., Renner, H., Krasnitzer, M., Hofbauer, C. (2012). Electric Arc Furnace with Static Var Compensator – Planning and Operational Experience. 10th EEC European Electric Steelmaking Conference. Graz, 457–464.

34. Liberado, E. V., Souza, W. A., Pomilio, J. A., Paredes, H. K. M., Marafao, F. P. (2013). Design of static VAr compensator using a general reactive energy definition. *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation 2013 (ISNCC 2013)*. doi: <https://doi.org/10.1109/isncc.2013.6604455>

35. Yanushkevich, A., Müller, Z., Švec, J., Tlustý, J., Valouch, V. (2014). Power Quality Enhancement using STATCOM with Energy Storage. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 349–354. doi: <https://doi.org/10.24084/repq12.336>

36. Yazdani, A., Crow, M. L., Guo, J. (2009). An Improved Nonlinear STATCOM Control for Electric Arc Furnace Voltage Flicker Mitigation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (4), 2284–2290. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2009.2027508>

37. Pires, I. A., Cardoso, M. M. G., Cardoso Filho, B. J. (2016). An Active Series Reactor for an Electric Arc Furnace: A Flexible Alternative for Power-Flow Control. *IEEE Industry Applications Magazine*, 22 (5), 53–62. doi: <https://doi.org/10.1109/mias.2015.2459093>

38. Samet, H., Ghanbari, T., Ghaisari, J. (2014). Maximizing the transferred power to electric arc furnace for having maximum production. *Energy*, 72, 752–759. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.105>

39. Gała, M. (2019). Praca pieca łukowego AC w systemie elektroenergetycznym. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1 (12), 248–253. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2019.12.56>

40. Elnady, A., Salama, M. M. A. (2007). Mitigation of the voltage fluctuations using an efficient disturbance extraction technique. *Electric Power Systems Research*, 77 (3-4), 266–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.03.011>

41. Malinovskyi, A., Turkovskyi, V., Muzychak, A., Turkovskyi, Y. (2018). The Efficient Power Supply Scheme of Alternating Current Electric Arc Furnaces. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). doi: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559585>

42. Turkovskyi, V., Malinovskyi, A., Muzychak, A., Turkovskyi, O. (2019). The Simulation and Analysis of the Probabilistic Characteristics of Schemes for Power Supply of Electric Arc Furnaces in Non-symmetric Modes. 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). doi: <https://doi.org/10.1109/cpee47179.2019.8949144>

43. Волков, И. В., Губаревич, В. Н., Исаков, В. Н., Кабан, В. П. (1981). Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наукова думка, 173.

44. Волков, И. В., Стяжкин, В. П., Подольный, С. В. (2009). Системы стабилизированного тока для автоматизированных электроприводов. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, 23, 64–71.

45. Malinovskyi, A. A., Turkovskyi, V. H., Muzychak, A. Z., Turkovskyi, Y. V. (2019). Peculiarities of the reactive power flow in the arc furnace supply circuit with improved electromagnetic compatibility. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 79–86. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-2/10>

46. Турковский, В. Г., Жовнир, Ю. М. (2001). Обоснование эффективности применения установки стабилизации режима в системе электроснабжения дуговых сталеплавильных печей переменного тока. *Промышленная энергетика*, 5, 40–44.

47. IEC 61000-4-15 Ed. 2.0 b:2010. (2010). *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and Measurement Techniques. Flickermeter - Functional and Design Specifications*.

48. Иванов, В. С., Соколов, В. И. (1987). *Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий*. М.: Энергоатомиздат, 336.

Not a reprint