

УДК 621.31**СИСТЕМИ ГАРАНТОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ПИТАННЯ ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

ДЕНИСЮК С.П., провідн. наук. співробітник Інституту електродинаміки НАН України, доктор техн. наук

ВСТУП

На сьогодні можна констатувати широке використання різноманітних електронних пристроїв як для багатофункціонального промислового, так і для інформаційного призначення. Однак електронні пристрої є критичними не тільки до якості електроенергії, але й перервам в електроживленні. Вони можуть виходити з ладу, коли спотворення сигналів складає навіть лише частки мілісекунд. Оскільки такі спотворення не є критичними для більшості загальнопромислових електроприймачів, то увага до швидкоплинних спотворюючих сигналів почала приділятися лише з поширенням останнім часом різних класів високоінтегрованих систем з електронними пристроями.

Як наслідок, виділився клас систем гарантованого електропостачання (СГЕ) – системи електропостачання, елементами котрих є група електроприймачів I категорії (згідно ПУЕ), які є критичними щодо надійності електропостачання. Забезпечення ефективної роботи таких систем є актуальною проблемою.

1. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ СИСТЕМ ГАРАНТОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Зростання складності та різноманітності режимів роботи СГЕ, збільшення розмірів структури (кількості об'єктів, які входять у ці системи) показують, що залучення традиційних підходів до їх модернізації та вдосконалення з метою підвищення їх енергоефективності, а також створення таких систем не дозволяють отримати оптимальні структури та оптимальні закони їх функціонування [4, 10, 16]. Потребують свого вирішення проблеми зниження рівнів споживання електроенергії в системах, оптимізації режимів роботи та параметрів СГЕ.

Проблема підвищення енергоефективності та надійності роботи СГЕ вимагає розробки нових підходів як до вдосконалення чи створення структур, так і законів функціонування різноманітних типів перетворювачів електричної енергії (ПЕЕ), що є складовими елементами СГЕ.

Характерна риса сучасних СГЕ – наявність у них різних типів перетворювального обладнання та нелінійних нестационарних елементів. Ці елементи обумовлюють наявність у системах вищих гармонічних складових у спектрі струму та напруги, а також несиметрію та неурівноваженість багатофазних сигналів. Вищі гармонічні складові в системах обумовлюють додаткове нагрівання елементів системи та втрати, функціональне порушення режимів роботи. Несиметрія та неурівноваженість у багатофазних СГЕ обумовлюються специфічними особливостями їх елементів та топології (конфігурації). Несиметрія та неурівноваженість фаз в СГЕ призводять до перетоків і рекуперації енергії не тільки між окремими елементами системи, але й окремими фазами. У більшості випадків елементи СГЕ задовольняють таким положенням: схеми заміщення елементів містять пасивні чи активні нелінійні, нестационарні елементи з зосередженими параметрами; процеси в елементах системи є детермінованими; наявність блоків регулювання та контролю, які можна представляти

функціональними моделями.

Основними видами перешкод, що поширюються по електромережах СГЕ, є [1, 17]: вищі гармоніки напруги (кратні та некратні основній частоті); несиметрія напруг, яка характеризується напругами зворотної та нульової послідовності; коливання напруги, під яким розуміють різкі та часті його зміни; короткочасні посадки (провали) та підвищення (викиди) напруги; імпульси напруги.

Крім зазначених перешкод, є ще дві характеристики – відхилення напруги та частоти, значення яких залежать в основному від роботи обладнання енергосистеми.

Перші три види перешкод практично постійно присутні в напрузі, їх значення з заданою достовірністю можуть бути обчислені на основі даних про структуру та режими роботи обладнання СГЕ. Джерела цих перешкод практично знаходяться в електромережах системи. Електромережі є для них передаточною ланкою, за допомогою якої вони проникають в мережі інших споживачів, які страждають від цих перешкод та висувають претензії до енергосистеми в цілому.

Забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС), тобто здатності обладнання нормально функціонувати в його електромагнітному середовищі, не створюючи недопустимих електромагнітних перешкод для іншого обладнання, що функціонує в цьому ж середовищі, елементів СГЕ по перешкодам перших трьох видів можливе лише при послідовному розв'язанні таких задач [1, 7]:

1) посилення вимог до обладнання, яке вносить спотворення в електромережу системи, що забезпечується використанням обладнання для усунення спотворень (індивідуальних та мережевих) у необхідних обсягах;

2) посилення вимог до якості електроенергії в мережах, що є можливим при розв'язанні першої задачі;

3) пом'якшення вимог до основної маси обладнання в частині рівнів спотворень, при яких це обладнання повинно нормально працювати, що є можливим у зв'язку з розв'язанням другої задачі.

Зазначимо, що обмеження імпульсів, які виникають в електромережах систем, здійснюється згідно з умовами захисту ізоляції обладнання, а не згідно з умовами його ЕМС. Короткочасні посадки напруги, причини яких обумовлені електромережами енергосистем, є предметом техніко-економічних розрахунків функціонування виділеного класу систем.

Відносно відхилення напруги та частоти. Протягом переважаючого часу СГЕ працюють в нормальних, відповідних до основних експлуатаційних режимах. Сумарна тривалість посадок напруги складає десяті частки відсотка. Аварійне пониження частоти також має бути короткочасним явищем. У загальному випадку енергосистема має нести повну відповідальність за рівні напруги та частоти в СГЕ.

Основними типами спотворень форм струму та напруги в СГЕ є: вищі гармоніки, частота яких кратна основній частоті; інтергармоніки – гармоніки, частота яких некратна основній частоті; коливання напруги; короткочасні провали (посадки) напруги, амплітуда яких перевищує 10 % та може досягати 100 % (перерви живлення); несиметрія напруги (у трифазних системах); сигнали систем управління, що передаються по електричних лініях; зміни частоти; компоненти постійного струму.

Наявність вищих гармонік, несиметрії та неурівноваженості напруги в електромережах СГЕ призводить до ряду небажаних явищ [7, 8, 16, 18]:

а) зростання додаткових втрат в мережах та елементах електрообладнання;

б) скорочення експлуатаційного терміну служби електрообладнання;

в) збою в роботі електронного обладнання та пристроїв релейного захисту і ав-

томатики;

г) погіршення показників технологічних процесів на промислових підприємствах;

д) негативного впливу на лінії зв'язку та пристрої автоблокування на електрифікованому транспорті;

е) появи небезпечних рівнів наведених напруг на проводах ліній електропередач, що будуються.

Для СГЕ необхідно особливо виділити втрати, пов'язані з нераціональним електроживленням. Вони виникають через несинусоїдальність струму і напруги та проявляються у зниженні коефіцієнта потужності чи обмеженні використанні в окремих випадках конденсаторних батарей. Крім того, потрібно враховувати також обмінні процеси [10, 16]. При підключенні до джерела живлення СГЕ кількох спотворюючих елементів постає питання нормування допустимого індивідуального внеску в загальний рівень спотворень сигналів. Для розв'язання цього питання необхідно знати механізм додавання гармонічних спотворень від різних джерел.

2. ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ ГАРАНТОВАНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

2.1. Реактивна потужність як критерій енергоефективності

Коротко зупинимося на понятті електричної потужності, як одному з головних факторів прояву та характеристики електроенергії [2, 9, 11, 16], характеристиці, на якій базуються практично всі підходи до оцінки технологічного енергозбереження в СГЕ. Історично поняття "реактивна потужність" пов'язується з наявністю в електричних системах (ланцюгах) елементів (реактивних), у яких електромагнітна енергія, що була раніше запасена, при відсутності втрат може бути повністю повернута до джерела цієї енергії. Неоднозначність, у порівнянні з системами з синусоїдальними струмами та напругами, у визначенні поняття "реактивна потужність" для СГЕ обумовила появу цілої низки тлумачень поняття "реактивна потужність".

У синусоїдальних системах існує єдиний принцип енергообміну між реактивними елементами різного роду: якщо в одному реактивному елементі, наприклад, в індуктивному, у даний проміжок часу накопичена енергія зростає, то у другому (ємнісному) елементі у той же час вона зменшується. Елемент системи по відношенню до системи в цілому в енергетичному відношенні поводить себе як реактивний елемент одного роду (визначається елементом з найбільшою енергоємністю). Поняття реактивної потужності $Q = UI \sin \varphi$, де $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$; φ_u, φ_i – початкові кути функцій $u(t)$ та $i(t)$, дозволяє характеризувати як обмінні процеси, так і мінімізацію втрат.

Для систем із несинусоїдальними функціями $i(t)$, $u(t)$ у загальному випадку число способів формального розкладу потужностей на ортогональні складові може бути довільним. Для СГЕ знаходять використання такі визначення реактивної потужності [2, 11, 16]:

- реактивна потужність за першою гармонікою Q_1

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1, \tag{1}$$

де $\varphi = \varphi_{u1} - \varphi_{i1}$; $\varphi_{u1}, \varphi_{i1}$ – початкові кути першої гармоніки напруги $u(t)$ та струму $i(t)$; U_1 та I_1 – діючі значення першої гармоніки напруги $u(t)$ та струму $i(t)$. Призначення – підведення балансу електроенергії та вибір компенсуючих пристроїв в лінійних системах, величина вимірювання електронними лічильниками;

- реактивна потужність Фризе Q_{Φ}

$$Q_{\Phi} = (S^2 - P^2)^{1/2}. \quad (2)$$

Призначення – характеристика додаткових втрат в усталеному режимі;

- реактивна потужність Будеана Q_B

$$Q_B = \sum_k Q_k = \sum_k U_k I_k \sin \varphi_k, \quad (3)$$

де Q_k – реактивна потужність k -ої гармоніки; $\varphi_k = \varphi_{uk} - \varphi_{ik}$; φ_{uk} , φ_{ik} – початкові кути k -ої гармоніки напруги $u(t)$ та струму $i(t)$; U_k та I_k – діючі значення k -ої гармоніки напруги $u(t)$ та струму $i(t)$. Призначення – величина вимірювання індукційних лічильників;

- диференціальна реактивна потужність Q_D

$$Q_D = \sum_k k Q_k = \sum_k k U_k I_k \sin \varphi_k. \quad (4)$$

Призначення – вибір оптимального значення компенсуючої ємності;

- інтегральна реактивна потужність Q_I

$$Q_I = \sum_k Q_k / k = \sum_k (U_k I_k \sin \varphi_k) / k. \quad (5)$$

Призначення – вибір оптимального значення компенсуючої індуктивності;

- потужність накопичення Q_H та обмінна потужність Q_{OB} (визначення дано в наступному підрозділі). Призначення – характеристика процесів накопичення та обміну енергією між різними частинами системи, характеристика енергоємності елементів.

Умовність та невизначеність поняття реактивної потужності в СГЕ обумовлює необхідність завжди робити застереження за способом її розрахунку, що призводить до обмеження ортогональних систем [3, 18, 29]. При аналізі енергетичних характеристик в СГЕ необхідно оперувати з миттєвими значеннями струмів $i(t)$, напруг $u(t)$ та потужностей $p(t)$, враховувати реальні процеси і особливості СГЕ.

З точки зору досягнення енергозберігаючого ефекту при проведенні енерготехнологічного обстеження при оцінці енергетичних процесів у СГЕ визначимо для подальшого розгляду такі дві складові, як обмінні процеси та втрати при передачі енергії, що досить ґрунтовно характеризують дві різні сторони процесу втрат енергії та дозволяють формувати підходи до енергозбереження.

2.2. Обмінні процеси

Суть обмінних процесів у перетині СГЕ покажемо на прикладі послідовного з'єднання генератор-навантаження [16]. Для довільної форми миттєвої потужності $p(t)$ через перетин генератор-навантаження інтервали t^+ , t^- , t^0 відповідають проміжкам часу, коли для миттєвої потужності виконуються умови $p(t) > 0$, $p(t) < 0$, $p(t) = 0$ (генератор відключений від навантаження - передача енергії відсутня); $t^+ + t^0 + t^- = T$; W^+ – величина енергії, яку передано від генератора до навантаження за інтервал часу t^+ ; W^- – величина енергії, яка повернута від навантаження до генератора за інтервал часу t^- .

Оскільки миттєву потужність можна представити сумою двох складових $p(t) = p_o(t) + p_n(t)$, де $p_o(t)$ – миттєва потужність перетворення електромагнітної енергії в інші види; $p_n(t)$ – миттєва потужність накопичення електромагнітної енергії в накопи-

чувачах, то обмінні потужності $Q_{\text{ОБ1}}$ та $Q_{\text{ОБ2}}$ визначаються співвідношеннями [16]

$$Q_{\text{ОБ1}} = \left(\int_0^{t^+} p_n(t) dt \right) / T; \quad Q_{\text{ОБ2}} = \left(\int_0^{t^+ + t^0} p_n(t) dt \right) / T. \quad (6)$$

Обмінні потужності $Q_{\text{ОБ1}}$ та $Q_{\text{ОБ2}}$ за умови постійної інтенсивності перетворення електромагнітної енергії у інші види можна представити таким чином:

$$Q_{\text{ОБ1}} = (P^+(t^+ + t^0) - P^-t^+) / T; \quad (7)$$

$$Q_{\text{ОБ1}} = (P^+t^- - P^-(t^+ + t^0)) / T, \quad (8)$$

де $P^+ = W^+ / T$; $P^- = W^- / T$; $\Delta Q_{\text{ОБ}} = Q_{\text{ОБ1}} - Q_{\text{ОБ2}} = Pt / T$; P – активна потужність на періоді T . Співвідношення для обчислення $Q_{\text{ОБ1}}$ та $Q_{\text{ОБ2}}$ за інших умов перетворення електромагнітної енергії в інші види наведено у роботі [16].

Величини $Q_{\text{ОБ1}}$ та $Q_{\text{ОБ2}}$ можна розглядати як інтегральні характеристики впливу різних факторів “неякісності” електроенергії на обмінні процеси. Для них можуть бути запропоновані співвідношення, що відображають реальний фізично обґрунтований баланс електроенергії в перетині системи [16]. Ці потужності дають можливість оцінити взаємодію елементів систем, які характеризуються різним гармонічним складом $u(t)$ та $i(t)$, зокрема, оцінити взаємодію двох генераторів напруги чи/та струму при довільному гармонічному складі їх сигналів; взаємодію між фазами в багатофазній системі; провести співставлення обмінних процесів у різних перетинах системи. Поняття “обмінна потужність” може бути поширене для оцінки обмінних процесів у перехідних режимах, а також стійкості самих режимів за рахунок введення граничних значень.

Формули для розрахунку $Q_{\text{ОБ1}}$ та $Q_{\text{ОБ2}}$ наведені в роботах [4, 10, 16].

При аналізі внеску вищих гармонічних складових у обмінні процеси, оптимізації енергетичних процесів в СГЕ, аналізі взаємного впливу елементів системи використовуються обмінні потужності $Q_{\text{ОБ}}^{(1)}$ та $Q_{\text{ОБ}}^{(\Sigma)}$, що відображають відповідно інтенсивність обмінних процесів в СГЕ, які відповідають основній та вищим гармонікам струму:

$$Q_{\text{ОБ}}^{(1)} = 1/T \int_0^{t^+} u(t) I_{m1} \sin(\omega t - \psi_{i1}) dt; \quad (9)$$

$$Q_{\text{ОБ}}^{(\Sigma)} = 1/T \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k=2}^n I_{mk} \sin(\omega t - \psi_{ik}) \right) dt. \quad (10)$$

3. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ

3.1. Проблема якості електроенергії та енергозбереження

Якщо власне параметри енергії дають кількісну характеристику властивостей енергії, то поняття якість електроенергії визначає відповідність параметрів енергії їх установленим значенням. Показниками якості електроенергії є величини, що характеризують якість електроенергії по одному чи кільком її параметрам [5, 7, 14, 16, 18, 19]. Зазначимо, що показники якості електроенергії за напругою відображають енергетичні властивості сигналу, тобто характеризують потужність (енергію) спотворення

напруги, міру негативного впливу енергії спотворення на елементи системи та технологічні процеси.

Характеристики та показники мають відповідати фізичним процесам в СГЕ і забезпечувати підведення балансу енергій, аналіз ефективності перетворення і використання енергії, управління якістю та ефективністю енергоспоживання. В залежності від технічних умов якості електроенергії має характеризуватися вимогами до активної потужності, що споживається, реактивної потужності, форми імпульсу чи імпульсної послідовності, тоді “неякість” електроенергії відповідно визначатиметься реактивною потужністю та втратами, активною потужністю, спотвореннями.

Показниками якості електроенергії у електроприймачів згідно ГОСТ 13109 – 97 можна визначити такі:

1) при живленні від електричних мереж однофазного струму: відхилення частоти; відхилення напруги; розмах коливання частоти; розмах зміни напруги; коефіцієнт несинусоїдальності напруги;

2) при живленні від електричних мереж трифазного струму: відхилення частоти; відхилення напруги; розмах коливання частоти; розмах коливання напруги; коефіцієнт несинусоїдальності напруги; коефіцієнт неурівноваженості напруги;

3) при живленні від електричних мереж постійного струму: відхилення напруги; розмах зміни напруги; коефіцієнт пульсації напруги.

При несинусоїдальній напрузі основним фактором, що визначає якість споживання електроенергії, є гармонічний склад, тобто форма кривої напруги. Оцінка ефективності споживання енергії при цьому ускладнюється через відсутність універсальних показників, оскільки коефіцієнти та співвідношення, які використовуються для оцінки синусоїдальних систем, при несинусоїдальних процесах дають неоднозначні результати та характеризують тільки окремі сторони споживання енергії, а не ефективність в цілому.

При вирішенні комплексу питань, пов’язаних зі спотвореннями струму і напруги, необхідно знати причини їх виникнення та характеристики конкретних джерел спотворень, характер та ступінь їх впливу на роботу електротехнічного та електроенергетичного обладнання, а також мати технічні засоби знешкодження спотворень чи захисту від них.

При нормалізації якості електроенергії велике значення мають здійснення апаратного контролю ПЯЕ, організаційний та економічний механізм впливу на винуватця погіршення якості електроенергії, розробка методів і технічних засобів подавлення спотворень. Зокрема, враховуючи можливість взаємного впливу навантажень один на одного, важливо правильно формулювати умови приєднання до електромереж системи нових споживачів, що обумовлює використання методів та програм розрахунків ПЯЕ на ЕОМ, які дозволяють оцінити електромагнітну ситуацію після такого підключення.

3.2. Система показників оцінки якості електроенергії

До нормалізованих показників якості електроенергії належать відхилення та коливання частоти, відхилення, коливання, несиметрія, неурівноваженість і несинусоїдальність напруги. Згідно з ГОСТ 13109–97 показниками якості електроенергії є: усталене відхилення напруги δU_v ; розмах зміни напруги δU_t ; доза флікера P_f ; коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ; коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$; коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} ; коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} ; відхилення частоти

ти Δf ; тривалість провалу напруги $\Delta t_{\text{п}}$; імпульсна напруга $U_{\text{имп}}$; коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$. При визначенні значень деяких показників якості електроенергії використовуються такі параметри електричної енергії: частота повторення зміни напруги $F_{\delta U_t}$; інтервал між змінами напруги $\Delta t_{i,i+1}$; глибина провалу напруги $\delta U_{\text{п}}$; частість появи провалів напруги $F_{\text{п}}$; тривалість імпульсу за рівнем 0,5 його амплітуди $\Delta t_{\text{имп}0,5}$; тривалість часової перенапруги $\Delta t_{\text{пер}U}$.

Установлено два види норм якості електроенергії: допустимі та гранично допустимі. Коротко зупинимося на окремих показниках якості електроенергії.

Відхилення напруги. Характеризується показником усталеного відхилення напруги, для якого встановлені такі норми: нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги δU_y на виводах приймачів електричної енергії дорівнюють відповідно ± 5 та ± 10 % від номінальної напруги електричної мережі згідно з ГОСТ 721 та ГОСТ 21128; нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання навантажень електричної енергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ та більше мають бути установлені в договорах на використання енергії між енергопостачальною організацією та споживачем з урахуванням необхідності виконання норм ГОСТ 13109–97 на виводах приймачів електричної енергії. Значення усталеного відхилення напруги δU_y розраховують у відсотках за формулою $\delta U_y = 100(U_y - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}}$, де $U_{\text{ном}}$ – номінальна міжфазна (фазна) напруга, В, кВ.

Коливання напруги. Характеризується такими показниками, як розмах зміни напруги та доза флікера. Гранично допустимі значення суми усталеного відхилення напруги δU_y та розмаху зміни напруги δU_t в точках приєднання до електромереж напругою 0,38 кВ дорівнює ± 10 % від номінальної напруги.

Розмах зміни напруги δU_t у відсотках обчислюють за формулою $\delta U_t = 100 | U_i - U_{i+1} | / U_{\text{ном}}$, де U_i, U_{i+1} – значення слідуєчих один за другим екстремумів чи екстремуму та горизонтальної дільниці обгинаючої середньоквадратичних значень напруги основної частоти, визначених на кожному півперіоді основної частоти, В.

Несинусоїдальність напруги. Характеризується такими показниками: коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U та коефіцієнтом n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$.

Обчислення значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$ у відсотках здійснюється за формулою $K_{U(n)} = 100U_{(n)} / U_1$, де U_1 – діюче значення напруги основної частоти, В, кВ. Допускається обчислювати даний показник якості електроенергії за формулою $K_{U(n)} = 100U_{(n)} / U_{\text{ном}}$.

Сам коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U в узагальному випадку визначається із співвідношення (у відсотках)

$$K_U = 100 \left(\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 \right)^{1/2} / U_1 \approx 100 \left(\sum_{v=2}^n U_v^2 \right)^{1/2} / U_{\text{ном}}, \quad (11)$$

де U_v – діюче значення напруги v -ої гармоніки, В, кВ; n – номер останньої гармоніки, що враховується.

Несиметрія напруги. Характеризується такими показниками: коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U} ; коефіцієнтом несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} .

Нормально допустимі та гранично допустимі значення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю в точках загального приєднання до електричних мереж дорівнюють відповідно 2,0 та 4,0 %. Нормально допустимі та гранично допус-

тимі значення коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю в точках загального приєднання до чотирипровідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ дорівнюють відповідно 2,0 та 4,0 %.

Імпульсна напруга. Характеризується показником імпульсної напруги $U_{\text{імп}}$.

Імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$ – вимірюється як максимальне значення напруги при різкій її зміні (тривалість фронту імпульсу не більше 5 мс).

Часова перенапруга. Характеризується показником коефіцієнта часової перенапруги $K_{\text{пер}U}$.

Коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$ визначається за формулою $K_{\text{пер}U} = U_{\text{amax}} / U_{\text{аном}}$, де U_{amax} , $U_{\text{аном}}$ – амплітудні значення максимальної та номінальної напруг.

Способи розрахунку та методики визначення показників якості електроенергії і допоміжних параметрів наведені в ГОСТ 13109 – 97.

Наведені нормативні показники широко використовуються на практиці і є директивними. Досвід їх використання показав доцільність доповнення відомих систем показників характеристиками і показниками, які оцінюють ефективність перетворення електроенергії, ступінь ЕМС тощо.

З урахуванням необхідності розгляду різних сторін енергетичних процесів в СГЕ, системи енергетичних характеристик і показників поряд з нормативними мають вміщувати додаткові складові [2, 4, 9, 16]:

- 1) характеристики обмінних процесів (обмінні потужності $Q_{\text{Об}}$, $Q_{\text{Об1}}$, $Q_{\text{Об2}}$, потужність накопичення $Q_{\text{Н}}$);
- 2) споживану активну потужність P ;
- 3) складові втрат активної потужності від різних факторів неякісності електромагнітних процесів (складові потужності Фризе $Q_{\text{Ф}}$);
- 4) модифікації реактивної потужності (реактивну потужність за першою гармонікою Q_1 , реактивну потужність Будеана Q_B , диференційну Q_D та інтегральну Q_I реактивні потужності);
- 5) показники, які характеризують форми сигналів $i(t)$, $u(t)$, $p(t)$, імпульсів та імпульсних послідовностей;
- 6) екстремальні значення сигналів $i(t)$, $u(t)$, $p(t)$ та їх похідні;
- 7) коефіцієнти перетворення енергії;
- 8) техніко-економічні показники;
- 9) сигнали управління та контролю;
- 10) характеристики взаємного впливу елементів системи, рівнів досягнення ЕМС.

3.3. Втрати електроенергії, обумовлені відхиленням показників якості електроенергії від нормованих значень

Погіршення економічних показників функціонування СГЕ через відхилення ПЯЕ обумовлює такі фактори [6 – 8, 15, 16]: зростання споживання активної та реактивної потужностей; зростання втрат активної потужності; скорочення терміну служби елементів СГЕ; зниження коефіцієнта потужності системи; обмеження сфери використання батарей конденсаторів; можливість виникнення побічних ефектів.

При визначенні економічних втрат у першу чергу необхідно враховувати відхилення ПЯЕ, що перевищують граничні межі. З метою підвищення точності оцінки втрат може виявитися доцільним враховувати відхилення ПЯЕ, які знаходяться в допустимих межах.

У відповідності до характеру впливу відхилень ПЯЕ на електронне і електротече-

хнічне обладнання розрізняють електромагнітну, технологічну та соціальну складові втрат [6, 7, 15, 16]. Перші дві можна оцінити економічно, остання пов'язана з впливом низької якості електроенергії на людину. Електромагнітна складова визначається в основному змінами втрат активної потужності та відповідними змінами терміну служби ізоляції електрообладнання. Технологічна складова обумовлюється впливом якості електроенергії на продуктивність технологічних установок.

Втрати через відхилення напруги. Втрати через відхилення напруги мають електромагнітну та технологічну складові. Перша з них виникає через зростання споживання реактивної потужності, зростання втрат активної потужності в двигунах, трансформаторах, лініях електроживлення. Технологічна складова втрат виникає в першу чергу через зниження продуктивності електроенергетичного та електротехнологічного обладнання, недовипуск продукції. Зменшення напруги призводить до зменшення світлового потоку освітлювальних приладів, що призводить до зниження продуктивності праці працівників.

Втрати через коливання напруги. Коливання напруги впливають як на самі джерела, так і на споживачів, обумовлюючи електромагнітну та технологічну складові втрат. Першу можна оцінити аналогічно складовій, обумовленій відхиленнями напруги. Технологічна складова втрат через коливання напруги обумовлена в основному впливом на зір людини миганням освітлювальних ламп. Крім того, коливання напруги можуть викликати передчасний вихід із ладу магнітних пускачів, конденсаторів, випрямлячів, пристроїв електронної техніки.

Втрати через несиметрію напруги. Електромагнітна складова втрат обумовлюється зростанням втрат активної потужності та споживанням активної і реактивної потужностей, недовиробництвом конденсаторами реактивної потужності, прискоренням процесів старіння ізоляції електрообладнання, погіршенням освітлення робочих поверхонь та скороченням термінів служби світильників.

Втрати через несинусоїдальність струму та напруги. Несинусоїдальність пов'язана з наявністю в СГЕ вищих гармонічних складових. Спотворення струму та напруги призводить до таких негативних наслідків: з'являються додаткові втрати потужності в лініях живлення, трансформаторах, батареях конденсаторів тощо; відбувається прискорене старіння ізоляції електричних машин, апаратів та кабелів і, як наслідок, зменшення надійності та терміну служби електрообладнання; погіршується точність електричних вимірювань; порушується робота електронних пристроїв, автоматики та захисту; утруднюється, а в окремих випадках стає неможливим використання силових ланцюгів як каналів для передачі інформації; погіршується, а іноді й порушується робота різних типів навантажень, в тому числі тих, які є джерелами несинусоїдальності сигналів; обмежується, а часто стає неможливим використання батарей конденсаторів через перевантаження їх струмами вищих гармонік та виникнення резонансних явищ. При цьому до електромагнітної складової втрат належать прискорене старіння ізоляції електрообладнання; зростання втрат активної потужності та споживання активної і реактивної потужностей; обмеження сфери використання батарей конденсаторів для підвищення коефіцієнта потужності.

3.4. Аналіз та контроль якості електроенергії

Аналіз якості електричної енергії передбачає виявлення причин невідповідності якості електричної енергії установленим значенням.

Аналіз та наступна оптимізація показників якості електроенергії мають реалізовуватися як для навантажень СГЕ, що вносять збурення, так і для генераторів та

інших навантажень системи. Важливу роль при цьому відіграють витрати (інвестиційні, експлуатаційні, повні річні тощо), пов'язані з введенням обладнання, яке забезпечує задані рівні ПЯЕ. Вирішення зазначених проблем вимагає пошуку оптимальних для даного споживача (навантаження) структури СГЕ та значень ПЯЕ.

При повному аналізі ПЯЕ необхідно враховувати:

- 1) функціональні перетворення, за якими будуються ПЯЕ, є функціоналами і виконуються операторами перетворення;
- 2) відображення множин ПЯЕ в СГЕ є взаємними відображеннями в кінцевомірному просторі, де важливим завданням є оцінка ймовірності отриманих результатів та звуження невизначеності;
- 3) ортонормовані системи ПЯЕ доцільно доповнювати показниками, побудованими за інтегральними та нелінійними перетвореннями, а також отриманими на основі аналізу якісних ознак протікання електромагнітних процесів та поведінки екстремальних режимів.

3.5. Обладнання для покращення якості електроенергії

Заходи щодо покращення синусоїдальності кривої напруги та струму мають вибиратися на основі вимірювання коефіцієнта несинусоїдальності, гармонічних складових кривої напруги та струму, частотних характеристик електромережі системи [6 – 8, 10, 12, 15, 18]. Заходи щодо покращення симетрії напруги в трифазній трипровідній електромережі мають вибиратися на основі вимірювання коефіцієнта несиметрії напруги в струмових навантаженнях фаз, заходи щодо покращення симетрії та урівноваженості напруги в трифазній чотирипровідній системі – на основі вимірювання коефіцієнта несиметрії та коефіцієнта неурівноваженості напруг, струмових навантажень фаз та нульового проводу.

Регулювання напруги. Забезпечити необхідний рівень напруги на зажимах електроприймачів можна шляхом зміни напруги на зажимах джерел живлення, коефіцієнта трансформації трансформаторів та значень втрат напруги в елементах СГЕ. Зміна напруги на шинах джерела призводить до зміни напруги на зажимах всіх електроприймачів, приєднаних до них.

Однотимчасне регулювання напруги на зажимах всіх електроприймачів є доцільним тільки в тому випадку, якщо вони однорідні. Якщо електроприймачі не однорідні, необхідно проводити аналіз їх графіків навантаження та групування їх таким чином, щоб в межах кожної групи електроприймачі можна було вважати однорідними.

Регулювання напруги зміною коефіцієнта трансформації трансформатора застосовується для розподільчих електромереж. Трансформатори, в яких регулювання коефіцієнта трансформації здійснюється у відкритому стані, мають діапазон регулювання $\pm 5\%$ номінальної напруги.

На значення втрат напруги в електромережах СГЕ можна впливати зміною реактивного опору поздовжніх елементів мережі або її розвантаженням по реактивній потужності.

Регульовані батареї конденсаторів є найбільш простим та ефективним засобом місцевого регулювання напруги. Слід застерегти, що при ступінчастому регулюванні потужності батарей в СГЕ можливі випадки виникнення паралельного резонансу (резонансу струму) на частоті якої-небудь із гармонік джерела.

Все більше використовуються регульовані статичні джерела реактивної потужності. Батареї конденсаторів чи реактори, що управляються за допомогою тиристорних ключів, використовуються в таких конденсаторах як накопичувачі енергії. Регу-

лювання генерованої (спожитої) реактивної потужності цього типу конденсаторів здійснюється через тиристри протягом кожного півперіоду напруги мережі.

Зниження коливання напруги. Здійснюється за допомогою розподілу навантажень; поперечної ємнісної компенсації параметрів лінії; швидкодіючих керованих статичних компенсаторів.

Для розділення швидкозмінних та спокійних навантажень можуть використовуватися різні схеми та пристрої. Найбільш простою є схема, що основана на використанні здвоєного реактора: спокійні та швидкозмінні навантаження підключаються до різних секцій (обмоток) реактора. Для різкозмінних та спокійних навантажень використовуються також трансформатори з рощепленими обмотками. Використання здвоєного реактора більш ефективно у випадку, коли коефіцієнт зв'язку між обмотками (секціями) дорівнює одиниці.

Швидкодіючі керовані статичні компенсатори все більш широко використовуються завдяки їх можливостям: вони не тільки знижують коливання напруги, але й забезпечують компенсацію реактивної потужності та зниження несиметрії напруги. Тут знаходять широке використання тиристорні перемикачі, які характеризуються великою швидкодією та можливістю управляти моментами включення і виключення.

Використання реакторів як елементів, що регулюються за допомогою тиристорів, у порівнянні з управляємими конденсаторами, характеризується такими перевагами: забезпечують обмеження швидкості зростання струму та його амплітудного значення, що полегшує режим роботи тиристорів; симетрують імпульс струму відносно моменту часу, що відповідає нульовому значенню напруги; дозволяють природну комутацію струму тиристорів.

Зниження несиметрії напруги. Несиметрію напруги, обумовлену несиметричними електроприймачами, можна обмежити до необхідних значень як за допомогою схемних рішень, так і шляхом використання спеціальних симетруючих пристроїв. Так, доцільно приєднувати електроприймачі, що призводять до несиметрії, до вузлів електромережі, де потужність короткого замикання в 50 та більше разів перевищує потужність короткого замикання однофазного навантаження.

В окремих випадках зниження несиметрії напруги може бути забезпечено раціональним розподілом навантажень. Симетрування за допомогою симетруючих пристроїв зводиться до компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності несиметричного навантаження та, як наслідок, обумовленої ним напруги зворотної послідовності.

В залежності від місця установки симетруючих пристроїв розрізняють індивідуальний, груповий, централізований та комбінований способи симетрування. Індивідуальні симетруючі пристрої встановлюються безпосередньо у несиметричних електроприймачів. При груповому симетруванні в різних точках електромережі СГЕ ставляться кілька симетруючих пристроїв, кожен із яких симетрує визначену ділянку електромережі з підключеною до неї групою несиметричних електроприймачів. При централізованому симетруванні в розподільчих мережах СГЕ ставиться один симетруючий пристрій. Комбінований спосіб симетрування передбачає поєднання двох чи трьох симетруючих способів.

Кожний із представлених способів має свої переваги. Так, індивідуальний спосіб дозволяє усунути несиметрію струмів та напруг безпосередньо у споживача, але при цьому встановлена потужність силових елементів симетруючих пристроїв використовується нерационально. При централізованому способі необхідна менша встановлена потужність елементів пристроїв, але в електромережі СГЕ із несиметричними

навантаженнями несиметрія струмів зберігається. Груповий спосіб симетрування поєднує переваги та вади індивідуального і централізованого способів.

Симетруючі пристрої виконуються керованими чи некерованими. Керовані симетруючі пристрої можуть мати як безперервне, так і ступінчасте (дискретне) управління. Конденсаторні батареї дискретних симетруючих пристроїв набираються з кількох груп, одна з яких підключається постійно, а інші – поперемінно. Переключення здійснюється за допомогою контакторів чи тиристорних ключів. У нинішній час знаходиться використання плавне регулювання ємнісних елементів шляхом підключення паралельно конденсаторам реакторів, що управляються тиристорами.

Для симетрування системи лінійних напруг при однофазних та дво- і трифазних несиметричних навантаженнях широко використовуються батареї конденсаторів з неоднаковими потужностями фаз, що застосовуються для компенсації реактивної потужності в електромережі СГЕ.

Сумарна потужність ємнісного симетричного пристрою вибирається з умови компенсації реактивної потужності. Вона перерозподіляється по фазах симетруючого пристрою таким чином, щоб струм зворотної послідовності несиметричної батареї конденсаторів компенсував струм зворотної послідовності несиметричного навантаження. У загальному випадку симетрування може бути здійснено за допомогою двох ємнісних елементів, підключених на різні лінійні напруги (в залежності від фази струму зворотної послідовності).

Симетрування системи напруг може бути здійснено шляхом введення системи додаткових ЕРС [12, 18]. Суть цього способу симетрування базується на тому, що між джерелом та приймачем в розрив лінійних проводів включаються додаткові джерела ЕРС, що утворюють систему зворотної послідовності. В результаті додавання ЕРС основного та додаткового джерел їх симетричні складові зворотної послідовності взаємно компенсуються, напруга на навантаженні стає симетричною.

Зниження несинусоїдальності напруги. Зниження несинусоїдальності напруги забезпечується або раціональною побудовою схеми СГЕ, при яких коефіцієнт спотворення кривої напруги буде в допустимих межах, або використанням спеціальних схем нелінійних навантажень, а також коригуючих пристроїв.

Забезпечити допустимий рівень несинусоїдальності в деяких випадках можна шляхом виділення нелінійних навантажень на окрему секцію шин, яка підключена до однієї з обмоток багатообмоточного трансформатора чи реактора. В окремих випадках доцільним може бути шлях розосередження нелінійних навантажень по різних вузлах СГЕ. Зниження рівнів гармонік за рахунок покращення форми кривої струму ПЕЕ в електромережі може бути досягнуто шляхом компенсації вищих гармонік магнітного потоку трансформатора чи накладанням струмів непарних гармонік, кратних трьом, на струми обмоток трансформаторів.

Для компенсації спотворень напруги та струму використовуються силові резонансні фільтри, фільтросиметруючі пристрої.

4. ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ

4.1. Складові втрат електроенергії в системі

Аналіз втрат електроенергії здійснюється для розв'язання таких складних задач [8, 10]:

а) пошук та оцінка потенціалу енергозбереження СГЕ по зменшенню втрат електроенергії;

б) пошук та ранжування основних факторів, які визначають рівень втрат електроенергії;

в) розробка заходів по зменшенню втрат електроенергії, визначення їх ефективності та черговості впровадження;

г) оцінка результатів роботи за показником втрат електроенергії системи в цілому та її складовим частинам;

д) підготовка та обґрунтування рішень по розвитку СГЕ і впровадженню заходів по зменшенню втрат, які вимагають капітальних вкладень.

Основними формами аналізу втрат електроенергії є:

а) складання балансу електроенергії за кожним виділеним елементом системи;

б) порівняння розрахункових, планових та звітних втрат електроенергії і аналіз зміни втрат за кожним виділеним елементом системи;

в) аналіз зміни окремих складових втрат електроенергії з урахуванням зміни схем, режимів електричних мереж та структури відпуску електроенергії;

г) порівняння звітних і планових нормованих та лімітованих складових балансу електроенергії (власні потреби, виробничі та невиробничі потреби);

д) оцінка фактичної ефективності окремих заходів по зменшенню втрат електроенергії, а також плану цих заходів в цілому;

е) виявлення залежностей втрат електроенергії від основних факторів, які характеризують схему електромережі системи та режими роботи СГЕ.

Структура втрат електроенергії включає такі складові: навантажувальні втрати в лініях, силових трансформаторах і автотрансформаторах; втрати холостого ходу трансформаторів і автотрансформаторів; витрати електроенергії в компенсуючих пристроях – батареях конденсаторів тощо; втрати в реакторах підстанцій; втрати у вимірювальних трансформаторах струму і напруги та їх вторинних ланцюгах, включаючи й лічильники електроенергії.

Для виділеного перетину СГЕ втрати при передачі енергії від генератора до навантаження, її перетворення на періоді T пропорційні квадрату діючого значення струму у виділеному перетині. Ці втрати складаються з суми необхідних втрат $R_s I_a^2 T = R_s P^2 T / U$, які обумовлені протіканням струму $i_a(t)$, та додаткових втрат $R_s I_p^2 T = R_s Q_\phi^2 T / U$, які обумовлені протіканням струму $i_p(t)$ (величина R_s моделює сумарний активний опір генератора та ліній електроживлення), де $i(t) = i_a(t) + i_p(t)$ [3, 16].

Розглянемо систему, яка складається з однофазного генератора напруги $u(t)$ нескінченної потужності та підключеного до нього навантаження зі струмом $i(t)$. Якщо функції $u(t)$ та $i(t)$ квадратично інтегровані на інтервалі часу ($a - b$), то для них виконується нерівність Коші-Шварца:

$$\left| \int_a^b u(t)i(t)dt \right|^2 \leq \int_a^b u^2(t)dt \int_a^b i^2(t)dt. \quad (12)$$

Розділивши обидві частини (12) на T^2 , де $T = b - a$, отримаємо

$$P^2 \leq U^2 I^2 = S^2. \quad (13)$$

При нарузі генератора $U = \text{const}$ активна потужність може передаватися у навантаження при різних значеннях діючого струму I . Ступінь відхилення P від S характеризується за допомогою реактивної потужності Фризе Q_ϕ [16].

Нерівність (13) перетворюється у тотожність тоді та тільки тоді, коли $u(t)$ та $i(t)$ лінійно незалежні. При цьому в навантаження передається активна потужність P ,

якщо коефіцієнт пропорційності між $u(t)$ та $i(t)$ дорівнює P/U^2 . Таким чином, для даних P та U мінімальному значенню діючого струму генератора відповідає миттєвий струм $i_a(t) = Pu(t)/U^2$, де $i_a(t)$ – активна складова струму $i(t)$.

Для квадрата діючого значення струму I^2 справедливим є співвідношення

$$I^2 = \left(\int_0^T i^2(t) dt \right) / T = \left(\int_0^T [i_a(t) + i_p(t)]^2 dt \right) / T = I_a^2 + I_p^2. \quad (14)$$

Оскільки $I_a = P/U$, то, враховуючи (14), має місце співвідношення

$$Q_\Phi = U[I^2 - I_a^2]^{1/2} = UI_p. \quad (15)$$

На основі (15) можна дати визначення реактивної потужності Фризе як потужності, що показує ступінь відхилення діючого струму генератора від його мінімально можливої величини для заданих напруги генератора та активної потужності, що передається у навантаження. Таким чином, реактивна потужність Фризе характеризує втрати енергії у СГЕ при передачі активної потужності P та встановленої потужності генератора S .

4.2. Оцінка впливу спотворюючих факторів на складові втрат

Додаткові втрати обумовлюються різними факторами неякісності електроенергії, які в свою чергу визначаються технологічними процесами, складом та структурою СГЕ [2, 16]. Якщо для кожного з n_Φ вибраної сукупності факторів можна виділити зміни $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{n_s}^j]$, $j = 1, \dots, n_\Phi$, спектра сигналу $x(t)$ (n_s – кількість ортогональних складових сигналу $x(t)$, що враховуються при розгляді втрат; Δx_i^j – зміна i -ої ортогональної складової сигналу $x(t)$ від впливу j -го фактора), то за характеристиками $\alpha [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{n_s}^j]$ досить просто визначити відповідну складову додаткових втрат.

Оскільки додаткові втрати пропорційні Q_Φ^2 , то їх поділ на складові проходить аналогічно поділу на складові реактивної потужності Фризе. Розглянемо процедуру поділу Q_Φ на складові для СГЕ з однофазними стаціонарними навантаженнями. Спочатку припустимо, що генератор СГЕ є генератором нескінченної потужності, за характеристиками $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{n_s}^j]$, $j = 1, \dots, n_\Phi$, можна розділити діючі значення струму:

$$I_p^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} I_{j,p}^2. \quad (16)$$

З урахуванням (16) квадрат потужності Фризе розбивається на ряд адитивних складових:

$$Q_\Phi^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} U^2 I_{j,p}^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} Q_{\Phi,j}^2, \quad (17)$$

де $Q_{\Phi,j}$ – складова додаткових втрат від впливу j -го, $j = 1, \dots, n_\Phi$, фактора. Якщо припустити, що і для діючого значення напруги U можна по аналогії з (16) записати

$$U^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} U_j^2,$$

то у загальному випадку для n_Φ вибраних факторів

$$Q_\Phi^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} U_j^2 I_{j2,p}^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} Q_{\Phi j l j 2}^2, \quad (18)$$

$$j_1 j_2 = 1$$

$$j_1 j_2 = 1$$

де $Q_{\Phi j_1 j_2}$ – складова додаткових втрат, яка визначається впливом j_1 -го фактора неякісності на напругу $u(t)$ та j_2 -го фактора на струм $i(t)$.

Якщо використати розклад $U^2 = U_*^2 + U_o^2$; $I_p^2 = I_*^2 + I_o^2$, де U_o, I_o – діючі значення напруги та струму, що обумовлені виділеною множиною факторів, то відповідні складові додаткових втрат визначаються співвідношеннями

$$\begin{aligned} Q_{\Phi}^2 &= (UI_*)^2 + (UI_o)^2 = (U_*I_p)^2 + (U_oI_p)^2 = \\ &= (U_*I_*)^2 + (U_*I_o)^2 + (U_oI_*)^2 + (U_oI_o)^2. \end{aligned} \quad (19)$$

Вираз (19) можна деталізувати до межі, яка задається співвідношенням (18). Необхідно відзначити, що кожному із представлених розкладів струму та напруги можна дати конкретну фізичну інтерпретацію. Приклади розкладу потужності Фризе у залежності від впливу конкретних факторів спотворення струму чи напруги розглянуті у [18].

5. ЗАХОДИ ПО ЗМЕНШЕННЮ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ СИСТЕМИ

Величини втрат, їх причини та структура є вихідними при розробці технічних та організаційних заходів для підвищення ефективності функціонування системи.

До найбільш ефективних заходів зменшення втрат електроенергії належать зменшення щільності струму, збільшення ступеню компенсації реактивної потужності, заміна трансформаторів на нові зі зменшеними втратами холостого ходу, оптимізація робочих режимів мереж. Основні заходи по зменшенню втрат електроенергії в СГЕ розподіляються на організаційні, технічні, по вдосконаленню систем обліку електроенергії. Нижче наведено орієнтовний перелік таких заходів:

1. Організаційні заходи:

- 1.1. Оптимізація місць розмикання ліній з двосторонім живленням;
- 1.2. Оптимізація усталених режимів електричних мереж по реактивній потужності;
- 1.3. Визначення оптимальної потужності та стимулювання установки компенсуючих пристроїв;
- 1.4. Оптимізація розподілу навантаження між генераторами;
- 1.5. Оптимізація робочих напруг в центрах живлення радіальних електричних мереж;
- 1.6. Відключення трансформаторів в режимах малих навантажень при двох та більше трансформаторів в системі;
- 1.7. Вирівнювання навантажень фаз в електричних мережах 0,38 кВ;
- 1.8. Скорочення тривалості технічного обслуговування та ремонту основного обладнання СГЕ;
- 1.9. Оптимізація режимів СГЕ по активній потужності.

2. Технічні заходи:

- 2.1. Установка та введення в роботу пристроїв компенсації реактивної потужності;
- 2.2. Заміна проводів на перевантажених лініях;
- 2.3. Заміна перевантажених і установка та введення в роботу додаткових силових трансформаторів;

- 2.4. Заміна недовантажених силових трансформаторів;
- 2.5. Установка та введення в роботу на трансформаторах з регулювання під напругою (РПН) пристроїв автоматичного регулювання коефіцієнта трансформації;
- 2.6. Установка та введення в роботу вольтододаткових трансформаторів з попереднім регулюванням в контурі;
- 2.7. Оптимізація завантаження електромереж СГЕ.

3. Заходи по вдосконаленню систем обліку електроенергії:

- 3.1. Організація рівномірного зняття показників електролічильників точно в установлені терміни по групах навантажень;
- 3.2. Установка окремих лічильників у навантажень;
- 3.3. Проведення перевірки електролічильників;
- 3.4. Виділення ланцюгів обліку електроенергії на окремі обмотки;
- 3.5. Усунення недовантаження та перевантаження по ланцюгам струму та напруги;
- 3.6. Усунення роботи електролічильників у неприпустимих умовах (усунення вібрацій тощо);
- 3.7. Установка електролічильників та автоматичних систем обліку електроенергії підвищених класів точності;
- 3.8. Установка додаткових електролічильників, трансформаторів струму та напруги;
- 3.9. Проведення перевірок і забезпечення своєчасності та правильності зняття показників електролічильників;
- 3.10. Установка електролічильників втрат на електромережах СГЕ.

6. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ

6.1. Електромагнітна сумісність та підвищення енергоефективності

В умовах дефіциту генерованої потужності, зношеності електронного та електротехнічного обладнання, широкого поширення нелінійних перетворювальних навантажень загострюється проблема електромагнітної сумісності [1, 14, 16, 17, 19]. Джерелами електромагнітних перешкод (ЕМП) стають не тільки навантаження, але й самі генератори електроенергії.

Під ЕМС розуміють здатність обладнання нормально функціонувати в його електромагнітному середовищі, не створюючи неприпустимих електромагнітних перешкод для іншого обладнання, яке функціонує у тому ж середовищі.

Проблема забезпечення ЕМС в цих системах безпосередньо пов'язана з оцінкою якості енергії. Вплив “неякості” електроенергії в СГЕ у більшості випадків виявляється на рівні порушень технологічних процесів, роботи інформаційно-обчислювальних систем тощо. Якщо поняття ЕМС в основному характеризує вимоги до елементів системи та їх взаємний вплив, то якість електроенергії сприймається як характеристика вимог, що висуваються до джерела електроенергії.

Однак термін “якість електроенергії” в СГЕ у цілому не відображає факт впливу на нього навантаження. Він сприймається як поняття, яке характеризує якість продукції (електроенергії), що поставляється, при невідповідності якої заданим нормам претензії висуваються тільки постачальнику. Тому більш комплексним та інформативним є поняття ЕМС, досягнення ЕМС елементів системи, що визначається вимогами, які висуваються до окремих елементів СГЕ.

Має місце зближення двох важливих напрямків – підвищення енергоефективності та ЕМС в електроенергетиці [16]. Адже стан ЕМС навантаження з генератором

досягається тоді, коли струм навантаження є пропорційним напрузі генератора протягом будь-якого довільно вибраного інтервалу часу. Останнє твердження є умовою оптимальної передачі електроенергії від генератора до навантаження, при виконанні якого втрати у лініях СГЕ мінімальні.

Рівень електромагнітної сумісності в системах електропостачання визначається як регламентований рівень кондуктивної електромагнітної перешкоди, який використовується як еталонний для координації між допустимим рівнем перешкод, що вносяться технічними засобами енергопостачальної організації та споживачів електричної енергії, і рівнем перешкод, що сприймаються технічними засобами без порушення їх нормального функціонування (ГОСТ 13109 – 97).

Рівень ЕМС є одним із визначальних показників СГЕ, що обумовлює величини їх техніко-економічних показників, вплив на інші системи та на навколишнє природне середовище.

Досягнення ЕМС визначається вимогами, які ставляться до окремих елементів СГЕ: задана якість $u(t)$ та $i(t)$; задана якість вхідної напруги; відсутність (заданий рівень) впливу електромагнітних процесів генераторів на процеси в навантаженні; відсутність (заданий рівень) взаємного впливу однотипних елементів системи один на одного; відсутність (заданий рівень) впливу на оточуюче середовище. Виявлення необхідних та достатніх умов існування ЕМС, оцінка рівнів ЕМП та заходи забезпечення ЕМС дозволяють розробити заходи як вимірювання ЕМП, ЕМС, так і їх зниження.

Моделі оцінки ЕМС системи повинні врахувати різні типи перешкод; наявність резонансів, кидків струмів та напруг; існування зворотних потоків енергії; перетоки енергії між елементами СГЕ, між фазами з більш завантаженої до менше завантаженої; зміни та спотворення сигналів.

Ступінь (рівень) ЕМС в контрольованому перетині СГЕ можна оцінити такими показниками (по мірі зниження значимості показника): 1) $u(t)/i(t) = R = \text{const}$ ($Q_{\phi} = 0$); 2) $Q_{\text{об}} = 0$; 3) $Q/Q_{\text{об}} = \pi$.

Без порушення узагальнення надалі оцінку впливу елементів в СГЕ розглянемо відносно критерію мінімуму втрат, тобто умови $u(t)/i(t) = \text{const}$. Для цього критерію в усталеному режимі рівність $Q_{\phi} = 0$ відображає умову ЕМС навантаження з джерелом живлення. Для перехідних та квазіусталених режимів умовою існування ЕМС навантаження із джерелом живлення є рівність нулю потужності Фризе для перехідного режиму [16] $Q_{\phi\tau} = 0$.

Вплив елементів СГЕ на ЕМС оцінюється у вузлі, контурі та системі в цілому. Для оцінки реакції електромережі принциповими є такі параметри: коливання напруги (фліккер-ефект), перенапруга, яка має перехідний (транзитний) характер, гармонічні коливання, несиметрія напруги, проміжні гармоніки.

При розгляді ЕМС в СГЕ необхідно враховувати ЕМП, які поділяються за характером на детерміновані та випадкові, короткочасні та довготермінові.

Поширення перешкод від джерела до навантаження здійснюється, в першу чергу, по електромережах СГЕ (кондуктивні перешкоди), при наведенні напруги в інформаційних лініях зв'язку полем джерела чи через електромагнітний зв'язок електричним кабелем, а також безпосередньо впливом поля джерела. Наприклад, для кабелю довжиною до 100 м затухання електромагнітної хвилі суттєво лише для імпульсів тривалістю менше 0,1 мкс. Для мікросекундного діапазону та частот до кількох мегагерц можна вважати кабель лінією без затухання, а зміни параметрів перешкод при поширенні в основному визначаються співвідношенням хвильових опорів кабелю, навантаження та джерела. Наведені напруги в інформаційних кабелях можуть визна-

чатися через взаємні індуктивності електричних та інформаційних ланцюгів – як симетричних (пар жил кабелів), так і несиметричних (ланцюгів жил-корпусів), а також ємністю зв'язку.

Установлено, що при появі на жилах кабелю несиметричної ЕМП на жилах сусіднього неекранованого кабелю може бути наведена напруга до 30 % вхідної. Заземлений екран знижує наводку на два – три порядки. В екранованих кабелях необхідно враховувати можливість протікання наведеного струму по екрану та параметри зв'язку екрану із внутрішніми жилами. Аналіз ЕМС проводиться на відповідних економіко-математичних моделях, що базуються на використанні миттєвих характеристик та функцій чутливості. Забезпечення ЕМС досягається як технічними, так і організаційними та економічними методами.

Проблеми ЕМС в СГЕ вирішуються трьома шляхами: індивідуальним подавленням ЕМП безпосередньо біля їх джерел; централізованим їх подавленням в системі; підвищенням захищеності чутливих навантажень від впливу ЕМП. Якщо перший та третій шляхи накладають обмеження на елементи системи, то другий передбачає виконання вимог до системи в цілому.

6.2. Аналіз допустимого внеску перетворювачів у складові втрат

Для визначення відповідальних за недопустимі значення показників, які характеризують несиметрію та неурівноваженість напруг, несинусоїдальність, коливання напруги на межі розподілу, необхідно провести вимірювання та зібрати інформацію про споживачів з ударним, нелінійним та несиметричним навантаженням, підключених у даному та суміжному вузлах, а також про режими роботи ПЕЕ, зазначених навантажень.

Для забезпечення оптимальних режимів роботи систем, вибору їх елементів, оцінки питомого внеску конкретних споживачів у викривлення сигналів у вибраних системах, порушення ЕМС роботи електроенергетичного, електротехнічного і прецизійного обладнання важливим є аналіз взаємного впливу елементів таких систем.

При підключенні до електромережі СГЕ кількох споживачів зі спотворюючими навантаженнями постає питання нормування припустимого індивідуального внеску в загальний рівень спотворень. Для вирішення цього питання необхідно знати механізм підсумовування гармонічних спотворень від різноманітних джерел. Пропонується проводити аналіз взаємного впливу, виходячи з принципів системності та базуючись на розгляді різних сторін енергетичних процесів.

Відомі різні підходи (критерії) оцінки окремих внесків, наприклад, на основі принципів “перший прийшов – перший обслуговується” (навантаження, яке підключається в останню чергу, несе більшу відповідальність за погіршення якості електроенергії, ніж попереднє), “кожний платить свою частку”. Як приклад зазначимо, що у Франції споживач не повинен вносити спотворення понад 1,6 % (тобто приблизно 1/3 від норми ЕМС, що дорівнює 5 %), при цьому внесок у кожен парну гармоніку не повинен перевищувати 0,6 %, а в непарну – 1 %. Принцип “кожний платить свою частку” є найбільш прийнятливим, але немає однозначного рішення для визначення частки такого впливу.

Введення поняття обмінної потужності дозволяє запропонувати алгоритм оцінки впливу [10]. Оцінка питомого внеску споживачів у спотворення сигналів здійснюється на основі обмінних процесів. Для цього система розкладається на дві ортогональні складові з наступним аналізом кожної з них. Перша складова містить лінійні елементи, друга – нелінійні, нестационарні.

Вплив елементів оцінюється поза залежністю від попередніх режимів роботи як системи в цілому, так і конкретних її елементів, а кількісні показники такого впливу визначати як суму кількісних показників впливу для кожного з виділених характерних режимів роботи системи. Алгоритм характеризується такою послідовністю кроків:

- 1) розрахунок електромагнітних процесів у СГЕ;
- 4) розрахунки обмінних процесів у вибраній моделі системи;
- 5) оцінка впливу i -го елемента СГЕ із співвідношення

$$Q_{в,i} = Q_{ОБi} / Q_{ОБS}, \quad (20)$$

де $Q_{ОБi}$ – обмінна потужність через перетин приєднання i -го елемента до СГЕ, що може визначатися за однією з формул (6) – (10); $Q_{ОБS} = \sum_i Q_{ОБi}$ – сумарна обмінна потужність.

Допустимий внесок елементів СГЕ у спотворення сигналів визначають стосовно до коефіцієнтів зворотної та нульової послідовностей, коефіцієнтів несинусоїдальності, гармонічних складових. Для визначення допустимого внеску необхідно знати механізми додавання спотворень різних типів, визначити допустимий рівень спотворень, які надходять від зовнішніх до даної підсистеми елементів.

При аналізі допустимого внеску перетворювачів у складові втрат у багатьох випадках експрес-аналізу важливо використовувати спрощені оцінки енергетичних характеристик та відповідних показників.

Побудову спрощених оцінок енергетичних характеристик, визначення співвідношень між енергетичними характеристиками і нормованими показниками проілюструємо на прикладі формування співвідношень між повною потужністю S та реактивними потужностями Q_{Φ} , Q_1 . Нехай $U^2 = U_1^2 + U_{\infty}^2$, $I^2 = I_1^2 + I_{\infty}^2$. Тут індекс "1" вказує на діюче значення першої гармоніки, індекс " ∞ " – на сумарні діючі значення вищих гармонік. Для потужностей S та P запишемо

$$S^2 = S_1^2 + S_{\infty}^2 = (U_1^2 + U_{\infty}^2)(I_1^2 + I_{\infty}^2) = U_1^2 I_1^2 + U_1^2 I_{\infty}^2 + U_{\infty}^2 I_1^2 + U_{\infty}^2 I_{\infty}^2; \quad (21)$$

$$P = \left(\int_0^T u(t)i(t)dt \right) / T = P_1 + P_{\infty}, \quad (22)$$

де $S_1^2 = U_1^2 I_1^2$; $S_{\infty}^2 = U_1^2 I_{\infty}^2 + U_{\infty}^2 I_1^2 + U_{\infty}^2 I_{\infty}^2$.

Тоді можна записати рівності

$$Q_{\Phi}^2 / S_1^2 = 1 + K_U^2 + K_I^2 + K_U^2 K_I^2 - P_1^2 / S_1^2 - 2P_1 P_{\infty} / S_1^2 - P_{\infty}^2 / S_1^2; \quad (23)$$

$$S_{\infty}^2 / S_1^2 = K_U^2 + K_I^2 + K_U^2 K_I^2, \quad (24)$$

де $K_U = U_{\infty} / U_1$ та $K_I = I_{\infty} / I_1$ – відповідно коефіцієнти спотворень кривої напруги та струму.

Якщо величиною P_{∞} не можна знехтувати, то ефективність передачі електроенергії визначається співвідношенням $\Delta_P = P_{\infty} / (P_1 + P_{\infty})$ або

$$P_{\infty} / S_1 < K_U K_I. \quad (25)$$

Аналогічно можна отримати співвідношення: (1) для систем постійного струму з пульсаціями за умови $U^2 = U_0^2 + U_\infty^2$; $I^2 = I_0^2 + I_\infty^2$, де U_0 та I_0 – діючі значення постійної напруги та струму; (2) при врахуванні падіння напруги генератора на лініях електропередач $(U \pm \Delta U)^2 \approx U^2 (1 \pm 2\Delta)$, де $\Delta = \Delta U/U$.

6.3. Заходи по забезпеченню електромагнітної сумісності

Процес аналізу ЕМС елементів в СГЕ досить складний та включає в себе вивчення джерел та видів перешкод, впливу на елементи системи, навантаження, ступінь сприйнятливості обладнання до тих чи інших видів перешкод та їх рівнів, поширення перешкод по електромережі, способів та засобів зниження рівнів перешкод і їх техніко-економічну оцінку, а також вдосконалення нормативних документів, які визначають допустимі рівні перешкод, що вносяться в електромережу, рівні перешкодо-сприйнятливості.

Рівень перешкодостійкості у різних типів електроприймачів СГЕ змінюється у досить широких межах. При довільному підключенні нових елементів СГЕ, знаючи їх належність до конкретного класу, бажано вибирати точки підключення без порушення ЕМС у конкретному перетині СГЕ. В окремих випадках експериментальні методи визначення електромагнітної обстановки можуть бути більш ефективними. Суть їх зводиться до того, щоб при відтворенні реальних процесів на первинній стороні (комутації роз'єднувачів чи перемикачів) здійснити вимірювання електромагнітних перешкод у вторинних колах.

Технічні засоби забезпечення ЕМС можуть бути реалізовані у трьох групах елементів, які приймають участь у процесі виробництва, передачі та споживанні енергії і взаємодіють один з одним: у джерел перешкод (індивідуальні установки); в електричних мережах СГЕ; у сприйнятливо до спотворень струму та напруги обладнання (буферні пристрої, які підвищують рівень перешкодозахищеності обладнання) [8, 12, 17, 18]. Для подавлення ЕМП в джерелі змінюють умови комутації (тобто зменшують швидкість зміни струму і напруги), а також склад і структуру СГЕ, використовують спеціальні схемні рішення та зовнішні перешкодоподавляючі пристрої. Наприклад, для зниження комутаційних імпульсів ЕМП можна рекомендувати усунення батарей конденсаторів з дільниць СГЕ, що часто переключаються, розряд конденсаторів після відключення, використання електронних перемикачів, зниження ємності мережі відносно корпусу, підключення діодів, варісторів та стабілітронів, паралельних індуктивності, що відключається.

Для зниження рівнів перешкод при їх поширенні по електромережі СГЕ використовують роздільне живлення навантажень за допомогою перетворювачів, здвоєнних реакторів, особливої структури СГЕ, виконують особливі вимоги до вибору та прокладання кабелів. Широке поширення отримують заземлення, вимоги до яких досить різноманітні. Для зниження рівнів перешкод також широко використовується екранування. Установка екранів може виконуватися або в безпосередній близькості до елемента СГЕ, на який впливає зовнішнє електромагнітне поле, або від джерела ЕМП.

Захист обладнання від ЕМП включає методи по захисту по ланцюгам живлення, передачі інформації і від електромагнітних полів, такі як використання нелінійних елементів, трансформаторів з електростатичними екранами, фільтрів, симетрування ліній передачі інформації, гальванічної розв'язки приймача та передавача інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аполлонский С.М., Вилесов Д.В., Воршевский А.А. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения // Электричество – 1991.–№ 4. – С. 1 – 6.
2. Денисюк С.П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика. – Київ: ІЕД НАНУ, 1999. – С. 46 – 59.
3. Денисюк С.П. Оптимизация электропотребления для энергосбережения в системах с преобразователями // Пробл. энергосбережения. – 1994.–№ 2–3.–С. 81 – 88.
4. Денисюк С.П. Оптимизация электропотребления для энергосбережения в системах с преобразователями // Пробл. энергосбережения.–1989.–Вып. 2.– С. 49 – 52.
5. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
7. Железко Ю.С. Влияние потребителя на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение // Пром. энергетика. – 1991. – № 8.
8. Железко Ю.С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях // Электричество. – 1992. – № 5. – С. 6 – 12.
9. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентиляных преобразователей. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 220 с.
10. Ковалко М.П., Денисюк С.П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. – К.: Українські енциклопедичні знання, 1998. – 512 с.
11. Крогерис А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э.П., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.
12. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях.–К.:Наук. думка, 1992.–240 с.
13. Правила користування електричною енергією. Затв. НКРЕ № 28 від 31.07.96. – Миколаїв: Крус, 1996. – 48 с.
14. Правила присоединения потребителя к сети общего пользования по условиям влияния на качество электроэнергии // Пром. энергетика. – 1991. –№ 8.
15. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 1. Электроснабжение / Под общ. ред. А.А.Федорова.–М.:Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
16. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я. и др. Баланс энергий в электрических цепях. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
17. Шидловский А.К., Борисов Б.П., Вагин Г.И. и др. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий. – К.: Наук. думка, 1992. – 236 с.
18. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
19. Эффективное энергоиспользование и альтернативная энергетика / А.Н. Криволапов, И. Классен, Э.П. Островский, В.Ф. Резцов, И.И. Стоянова; Под. ред.А.К. Шидловского – К.:Українські енциклопедичні знання, 2000. – 302 с.