

Соломчак О.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Николайчук М.Я.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Соломчак А.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ СТАТКОМ В МЕРЕЖАХ З ВІТРОВИМИ ТА СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

У статті розглянуто підходи, стратегії та алгоритми керування статичним компенсатором реактивної потужності (СТАТКОМ) в електричних мережах із вітровими та сонячними електростанціями. Проведено аналіз негативного впливу вітрових та сонячних електростанцій на електричну мережу: відхилення та коливання напруги, стійкість мережі, вищі гармоніки, якість електроенергії. На основі аналізу останніх досліджень та публікацій встановлено необхідність вдосконалення алгоритмів систем керування СТАТКОМ. Наведено переваги використання СТАТКОМ для стабілізації та покращення параметрів режимів електричних мереж, підвищення надійності та ефективності електропостачання: регулювання та стабілізація напруги, компенсація вищих гармонік, компенсація реактивної потужності. Розглянуто 4 стратегії керування СТАТКОМ: миттєве активно-реактивне керування, позитивно- та негативно-послідовний контроль, усереднене керування активними та реактивними компонентами, збалансоване керування з позитивною послідовністю. Після оцінки різних стратегій для визначення опорного струму в умовах незбалансованої мережі можна стверджувати, що основні проблеми при розрахунку опорного струму зосереджені на: величині коливань активної потужності, величині коливань реактивної потужності, гармонічному вмісті сигналу, що генерується. Показано, що стратегії, які досягають кращих результатів щодо здатності генерації потужності, це в основному ті, які генерують синусоїдальні струми. Однак ці види стратегії викликають коливання потужності, і лише для PNSC і AARC можна знайти окремі випадки, коли ці коливання відсутні. З іншого боку, IARC є найвигіднішою стратегією з точки зору керування потужністю, але, на жаль, дозволяє найменшу величину генерації потужності за незбалансованих умов, одночасно вводячи максимальну кількість гармонік серед представлених методів.

Ключові слова: СТАТКОМ, електрична мережа, сонячні електростанції, вітрові електростанції, якість напруги, стійкість, керування, моделювання режимів.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток сонячної та вітрової енергетики в Україні призвів до значного збільшення їх потужності та впливу на параметри режимів електричної мережі.

Це спричиняє наступні негативні наслідки: коливання напруги, підвищення/зниження напруги, проблеми зі стійкістю, необхідність регулювання напруги, проблеми інтеграції великої кількості сонячної та вітрової енергії в мережу.

Таким чином, хоча сонячна та вітрова енергія пропонують значні переваги для навколишнього середовища, їх нестійкий характер може викликати коливання напруги та проблеми зі стабільністю в електричній мережі. Ефективне управління електромережею, використання інтелектуальних технологій і належне планування інтеграції є важливими для забезпечення успіш-

ної інтеграції цих відновлюваних джерел, зберігаючи при цьому стабільне та надійне електропостачання.

Однією з перспективних технологій, які можуть забезпечити стабільність та рівень напруг у визначеному стандарті [1] рівні є Статичний компенсатор реактивної потужності (СТАТКОМ). Це пристрій, що використовується в електроенергетиці для управління реактивною потужністю в електричній мережі. Статичний компенсатор дозволяє компенсувати або керувати цією реактивною потужністю, щоб забезпечити стабільну напругу та ефективну роботу системи. СТАТКОМ може включати різні компоненти, такі як конденсатори та індуктивності (реактори), які можуть бути комутовані або регульовані залежно від поточних вимог мережі. Це допомагає знизити

втрати потужності, покращити якість електроенергії та підтримувати стабільну напругу.

Проте для використання в електричних мережах із сонячними та вітровими електростанціями необхідно вдосконалення алгоритмів систем керування СТАТКОМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ефективність і якість електроенергії визначається міжнародними стандартами IEC-61400-21 [2, 3] та IEC-61724-1 [4, 5], які чітко наголошують на стабільності системи у разі подачі електроенергії в мережу. Коли вітрова чи сонячна енергія подається в мережу, можливі різні дисбаланси, такі як просідання напруги, зростання напруги, мерехтіння та гармоніки, зміни напруги системи, частоти, активної та реактивної потужності. IEC 61400-21-2:2023 [3] визначає та конкретизує величини, які визначаються для характеристики електричних характеристик підключених до мережі електростанцій (ЕС). У дослідженні [6] аналізуються та порівнюються флікер-випромінювання, коливання напруги та механічні навантаження для двох невеликих вітрових турбін (WT) з урахуванням різних стратегій керування. Для оцінки флікер-емісії у роботі [7] запропоновано використовувати квадратичний показник. Цей показник був обраний на основі досліджень, проведених на ВЕС. Досліджено флікер-випромінювання окремого вітрогенератора та вітрової станції. У [8] запропонована модель процедури вимірювання коливань напруги мережевих вітрогенераторів. У статті розглядається тест перевірки процедури вимірювання мерехтіння та результати, продемонстровані шляхом моделювання відповідно до стандарту вимірювання та оцінки IEC-61400-21-1. У дослідженні [9] успішно впроваджено систему вимірювання флікеру напруги, яка може допомогти інженерам передбачити флікер напруги та оцінити, чи підходить регіон або мережа для встановлення вітрових турбін чи сонячних електростанцій. У статті [10] обговорюється комплексне керування системою вітрової турбіни, підключеної до промислового підприємства. Розроблено алгоритм, що дозволяє створити структуру керування, яка використовує інвертор, підключений до мережі, для введення балансуєної енергії, а також працювати як фільтр активної потужності та покращуючи якість електроенергії. Розглядається чотирипровідна система з трифазними і однофазними лінійними і нелінійними навантаженнями. Авторами [11] отримано умови симетрування навантажень за допомогою СТАТКОМ з використанням комплексних струму та провідності зво-

ротної послідовності навантаження. Досліджено помилки симетрування за різних статичних характеристик навантажень за напругою в разі керування за збуренням. В [12] досліджено вплив статичного синхронного компенсатора (СТАТКОМ) на показники якості електроенергії в мережах з несиметричним та нелінійним навантаженням.

Метою статті є аналіз існуючих підходів до вирішення питання та визначення задач вдосконалення алгоритмів систем керування статичними компенсаторами реактивної потужності в мережах із вітровими та сонячними електростанціями.

Виклад основного матеріалу. Конвертерна енергогенерація – це процес виробництва електроенергії за допомогою електронних пристроїв, таких як інвертори, конвертери та перетворювачі. Цей підхід зазвичай використовується для зміни форми, напруги або частоти електроенергії для відповідності потребам конкретних пристроїв чи систем. Одним з популярних методів конвертерної енергогенерації є використання сонячних панелей та інверторів для перетворення сонячної енергії в постійний струм для подальшого використання у домашніх або промислових системах. Крім того, конвертерна енергогенерація може бути використана для інших джерел відновлювальної енергії, таких як вітер та гідроенергія. Цей підхід також може бути використаний у системах зберігання енергії, де конвертери допомагають перетворити та зберегти енергію для подальшого використання. У різних галузях промисловості та технологій застосовуються різні типи конвертерів для оптимізації виробництва та ефективного використання енергії. Загалом, конвертерна енергогенерація є важливою складовою сучасних енергетичних технологій, спрямованих на підвищення ефективності та використання відновлювальних джерел енергії.

Важливо врахувати, що слабкі умови мережі перешкоджають інтеграції вітрових та сонячних електростанцій у мережу. Особливо мережі з низькою інерцією та великим опором мережі ставлять під сумнів можливості відповідності частоти та напруги. Це пояснюється низькою інерцією та слабким демпфуванням, які легко викликають небажані коливання в системі через динаміку мережі. Існує чітка кореляція між більшою кількістю конвертерного виробництва електроенергії та меншою інерцією системи.

СТАТКОМ (статичний компенсатор реактивної потужності) є електронним пристроєм, який використовується для керування реактивною потужністю в електричних мережах. Його осно-

вна функція полягає в компенсації реактивної потужності, зокрема виправлення фазового зсуву між струмом і напругою, що сприяє підвищенню ефективності енергосистеми.

Використання СТАТКОМ в електричних мережах має кілька переваг. По-перше, він забезпечує зниження споживання електроенергії і покращує коефіцієнт потужності, що призводить до економії енергоресурсів і зменшення втрат електричної енергії. Це особливо корисно для промислових підприємств, де споживання електроенергії є значним.

По-друге, використання СТАТКОМ допомагає підтримувати стабільну напругу в електричній мережі, запобігаючи перепадам напруги та зниженню якості електропостачання. Це важливо для багатьох сфер, включаючи індустрію, комерційні будівлі та житлові комплекси, де надійне та стабільне електропостачання є критичним фактором.

Крім того, СТАТКОМ є гнучким у використанні, оскільки може бути налаштований для автоматичного керування реактивною потужністю в залежності від потреб системи. Він може працювати як в режимі реактивної компенсації, так і в режимі гармонічних фільтрів, покращуючи якість електричної енергії та зменшуючи спотворення.

Застосування СТАТКОМ в електричних мережах із вітровими та сонячними електростанціями може бути корисним для керування реактивною потужністю та покращення ефективності енергосистеми.

Основні методи використання СТАТКОМ в таких системах включають наступне:

Компенсація реактивної потужності. Використання СТАТКОМ дозволяє активно керувати реактивною потужністю, забезпечуючи компенсацію надлишкової або недостатньої реактивної потужності, що допомагає збалансувати систему та знизити втрати електроенергії.

Регулювання напруги. Вітрові та сонячні електростанції можуть впливати на рівень напруги в електричній мережі через зміну виробництва електроенергії. Використання СТАТКОМ дозволяє контролювати рівень напруги шляхом компенсації реактивної потужності та підтримувати стабільну напругу в системі.

Компенсація гармонік. Вітрові та сонячні електростанції можуть спричиняти гармоніки в електричній мережі, що може впливати на якість електропостачання. СТАТКОМ може використовуватись для фільтрації гармонік та зменшення їх впливу на систему, покращуючи якість електричної енергії.

Підтримка стабільності мережі. Сонячні та вітрові електростанції можуть впливати на стабільність електричної мережі через зміну вироб-

ництва електроенергії. Використання СТАТКОМ допомагає збалансувати потужність і реактивну потужність, підтримуючи стабільність мережі та запобігаючи можливим проблемам, пов'язаним зі змінним виробництвом електроенергії.

Всі ці застосування СТАТКОМ допомагають підвищити ефективність використання вітрової та сонячної енергії, забезпечуючи стабільне та якісне електропостачання. Враховуючи зростання використання сонячної та вітрової енергії, СТАТКОМ може бути важливим компонентом управління та оптимізації електричних мереж.

В дослідженні [13, с. 5211–5216] проведено оцінку реактивної потужності вітрових турбін під час роботи в двох режимах: нормальна робота та провал напруги. У цьому дослідженні розглядаються вітрові турбіни вітрові турбіни зі змінною швидкістю (ВТЗШ), вітрові турбіни зі сталою швидкістю (ВТСШ) з батареєю конденсаторів і ВТСШ зі СТАТКОМ. Це дослідження вказує на те, які типи вітряних турбін слід використовувати з точки зору можливостей підтримки реактивної потужності, і може допомогти операторам енергосистем визначити кількість реактивної потужності, яку можуть підтримувати вітрові електростанції. Використання СТАТКОМ підвищує продуктивність ВТСШ у регулюванні реактивної потужності, оскільки він може генерувати або споживати реактивну потужність. ВТСШ зі СТАТКОМ здатний отримувати більше реактивної потужності, ніж він може постачати в мережу, і його діапазон споживання завжди більший, ніж діапазон його генерації. У випадку низької напруги ВТСШ із встановленим СТАТКОМ може підтримувати найвищу реактивну потужність в мережу, якщо потужність СТАТКОМ співрозмірна з потужністю вітрової турбіни. Для швидкого реагування на зміни напруги в мережі в аварійних режимах необхідні відповідні алгоритми роботи СТАТКОМ.

В плані підвищення надійності та стабільності електричних мереж є стратегія керування на базі формування сітки (СКФС) – це метод управління електроенергетичними системами, який дозволяє створювати внутрішню сіткову структуру в розподільчих чи магістральних мережах. Цей підхід особливо важливий у випадках, коли відсутність сталого зв'язку з основною електричною мережею, або коли система повинна відновлювати свою роботу після відключень або інших збурень.

Головною ідеєю СКФС є створення в силовій мережі «сіткового ефекту», подібного до того, який існує у звичайних генеруючих системах.

Це допомагає підтримувати стабільну напругу та частоту у мережі, навіть коли генератори або споживачі від'єднані від центральної мережі.

Стратегія СКФС використовує різні методи керування, такі як динамічне розподіл навантаження, координація між різними джерелами виробництва енергії (сонячні панелі, вітрові турбіни, акумулятори тощо) та адаптація до зміни умов. Вона базується на розумному алгоритмі керування, який враховує різні параметри системи та забезпечує її ефективну роботу. Застосування стратегії СКФС може допомогти підвищити надійність та стійкість електромережі, зменшити вплив відключень на споживачів та сприяти інтеграції відновлювальних джерел енергії.

З точки зору використання СТАТКОМ можливі 4 стратегії керування:

1. Миттєве активно-реактивне керування (Instantaneous Active-Reactive Control (IARC)).

Миттєвий активно-реактивний контроль є технічною стратегією керування енергією, що використовується в електроенергетичних системах для підтримки стабільності, зниження втрат енергії та оптимізації роботи електричних мереж. Цей метод включає в себе миттєве реагування на зміни в споживанні електроенергії та інших факторах, що можуть впливати на стан системи.

IARC дозволяє регулювати як активну, так і реактивну потужність в електричній мережі, забезпечуючи баланс між виробництвом та споживанням енергії. Це може бути досягнуто шляхом керування параметрами, такими як напруга, струм, фазові кути тощо. IARC використовується для підтримки якісної постачання електроенергії та уникнення перевантажень чи нестабільності в електромережі.

Ця стратегія є важливою для забезпечення ефективності та надійності роботи електроенергетичних систем, особливо в умовах зростаючого попиту на електроенергію та використання відновлюваних джерел енергії.

Миттєва активна потужність p , що генерується, або споживається підключеним до мережі трифазним перетворювачем потужності, може бути розрахована як

$$p = v \cdot i, \quad (1)$$

де $v = (v_a, v_b, v_c)$ – вектор напруги в точці спільного приєднання, $i = (i_a, i_b, i_c)$ – вектор струму, що генерується в таку точку, а « \cdot » являє собою скалярний добуток обох векторів.

Миттєва реактивна потужність q , що генерується перетворювачем потужності, внаслідок взаємодії між вектором струму та загальним вектором напруги v , може бути записана як

$$q = |v \times i|. \quad (2)$$

Миттєва реактивна потужність може бути визначена як модуль векторного добутку між v та i . Однак миттєву реактивну потужність також можна розрахувати за допомогою наступного скалярного добутку:

$$q = v_T \times i, \quad (3)$$

де v_T є ортогональною версією (з випередженням 90°) вихідного вектора напруги мережі v .

З огляду на рівняння (1) і (3) будь-який вектор струму, узгоджений з вектором напруги v , призведе до активної потужності, тоді як будь-який вектор струму, узгоджений з v_T генеруватиме реактивну потужність. Ця концепція може бути представлена наступними виразами, які складають основу стратегії миттєвого активно-реактивного керування IARC для визначення опорних струмів:

$$i_p^* = g \cdot v; \quad (4)$$

$$i_q^* = b \cdot v_T, \quad (5)$$

де i_p^* та i_q^* можна розглядати як вектори активного і реактивного струмів відповідно, g та b активна та реактивна провідності, обидві дійсні величини, які встановлюють пропорцію між векторами напруги і струму.

2. Позитивно- та негативно-послідовний контроль (Positive- and Negative-Sequence Control (PNSC)).

Метод керування в системах електропостачання, особливо в контексті контролю над послідовними компонентами струму або напруги.

Позитивно-послідовний контроль визначає реакцію системи на позитивний послідовний компонент струму чи напруги, який зазвичай виникає внаслідок несиметричних подій у системі, таких як короткі замикання. Негативно-послідовний контроль відповідає за негативний послідовний компонент і може бути важливим для виявлення асиметрій і неузгодженостей в електричних мережах.

Позитивно- та негативно-послідовний контроль є важливими з точки зору забезпечення стійкості та надійності електроенергетичних систем. Цей метод дозволяє швидко виявляти і реагувати на відхилення, зменшуючи можливість пошкоджень обладнання та забезпечуючи безперебійне живлення споживачів.

3. Усереднене керування активними та реактивними компонентами (Average Active-Reactive Control (AARC)).

Метод керування енергією в електричних мережах, який дозволяє підтримувати стабільний рівень напруги та керувати потоками електроенергії, зокрема активною та реактивною потужностями.

AARC зазвичай використовується в електроенергетичних системах для оптимізації використання електроенергії та забезпечення ефективності та стабільності електричних мереж. Цей метод може включати в себе такі елементи, як автоматичні регулятори напруги, реактивні компенсатори, а також спеціальні алгоритми керування, які допомагають підтримувати оптимальний баланс між активними та реактивними потужностями.

Застосування AARC дозволяє зменшити втрати енергії, підвищити ефективність роботи системи та забезпечити стабільну якість електропостачання.

4. Збалансоване керування з позитивною послідовністю (Balanced Positive-Sequence Control (BPSC)).

Метод керування електричними системами, який спрямований на підтримання балансу між фазами в системі змінного струму. Цей метод використовується в електроенергетичних системах для забезпечення стабільності напруги та струму в трьох фазах.

BPSC допомагає вирівнювати амплітуди та фазові кути струмів і напруг у системі, забезпечуючи більш ефективну та надійну роботу електричної мережі. Це особливо важливо в ситуаціях, коли виникають дисбаланси через зміни навантаження або інші фактори.

BPSC може бути реалізований за допомогою різних керуючих алгоритмів та обладнання, таких як контролери реактивної потужності, регулятори напруги та інші системи автоматичного керування. Використання BPSC допомагає зменшити втрати електроенергії, поліпшити якість електропостачання та забезпечити стабільну роботу системи.

Цей метод є важливою складовою сучасних електроенергетичних систем і допомагає забезпечити ефективну та надійну роботу електричних мереж.

Для порівняння стратегій керування розглянемо умовну схему мережі з вітровою електростанцією та СТАКОМ (рис. 1).

У системі, зображеній на рис. 1, збурення виникає в електричній мережі з ВЕС, до якої підключено СТАКОМ. Опорні струми для СТАКОМ, визначені стратегіями IARC, PNSC, AARC і BPSC за таких умов перехідного процесу в мережі, представлені нижче. Оскільки в цьому простому прикладі інтерес представляють лише показники еталонних струмів, припускається, що потужність збурення в точці з'єднання набагато вища, ніж реактивна потужність, подана СТАКОМ. Таким чином, передбачається, що на напругу в точці з'єднання практично не впливає струм, введений СТАКОМ.

Результати, отримані за допомогою чотирьох стратегій керування [14], показані на рис. 2. Незбалансовані напруги мережі показані на рис. 2 (а). На наступних двох графіках, рис. 2 (b) і (c), миттєва активна та реактивна потужності генеровані в мережу. Нарешті, форми струму, отримані за допомогою кожної стратегії керування, зображені на рис.(d).

В проміжку часу від $t = 0$ і $t = 40$ мс застосовується стратегія IARC, що призводить до рівних миттєвих активних і реактивних потужностей, тоді як отримані струми сильно спотворені. Після $t = 40$ мс вмикається стратегія PNSC. У цьому випадку опорні струми складаються з набору незбалансованих трифазних сигналів, але без гар-

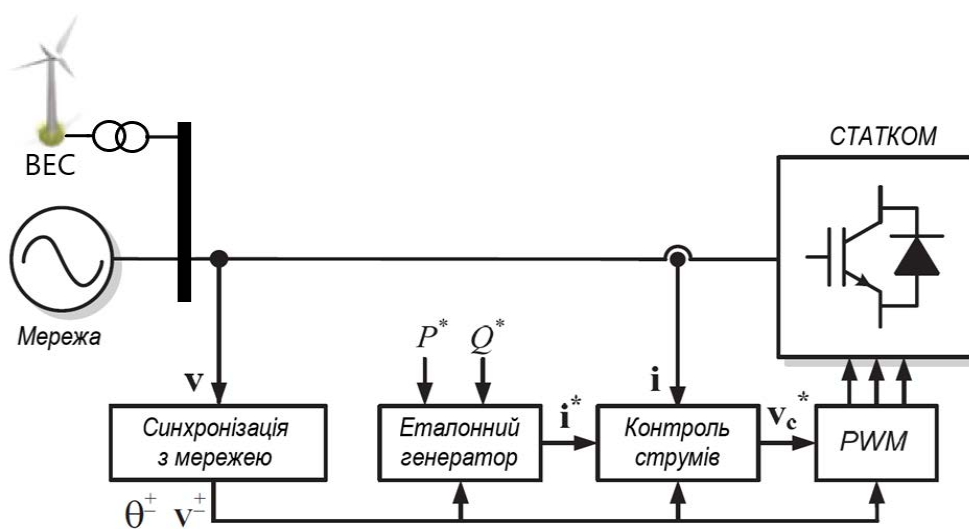


Рис. 1. Приклад схеми мережі зі СТАКОМ

монійних спотворень, як і очікувалося. Що стосується поведінки потужності, доведено, що реактивна потужність залишається постійною, тоді як активна потужність представляє коливання навколо нульового середнього значення.

Від $t = 80$ мс до $t = 120$ мс генератор опорного струму реалізує стратегію AARC. Як видно з рисунку, отримані струми знову синусоїдальні. Крім того, максимальна амплітуда цих струмів нижча, ніж отримана за стратегіями IARC і PNSC, зберігаючи те саме значення Q . Ця особливість вказує на те, що за допомогою AARC можна досягнути більш високого значення реактивної потужності, що вводиться в мережу за незбалансованих умов, що є значною перевагою. Крім того, миттєва активна потужність, споживана стратегією AARC, не містить коливань, що зменшує коливання напруги на шині постійного струму СТАТКОМ.

Нарешті, поведінка BPSC зображена в кінці графіків моделювання, від $t = 120$ мс до $t = 160$ мс. У цьому випадку, оскільки в мережу не вводяться компоненти зворотної послідовності, виникають коливання як активної, так і реактивної потужності. Однак ця техніка ще більше покращує переваги AARC щодо зменшення максимального струму. З рис.2. можна стверджувати, що BPSC є тим, який дає найнижче пікове значення генерованого струму серед усіх чотирьох порівнюваних стратегій, одночасно вводячи однакове середнє задане значення реактивної потужності.

Після оцінки різних стратегій для визначення опорного струму в умовах незбалансованої мережі можна стверджувати, що основні проблеми при розрахунку опорного струму зосереджені на:

- величині коливань активної потужності,
- величині коливань реактивної потужності,
- гармонічний вміст сигналу, що генерується.

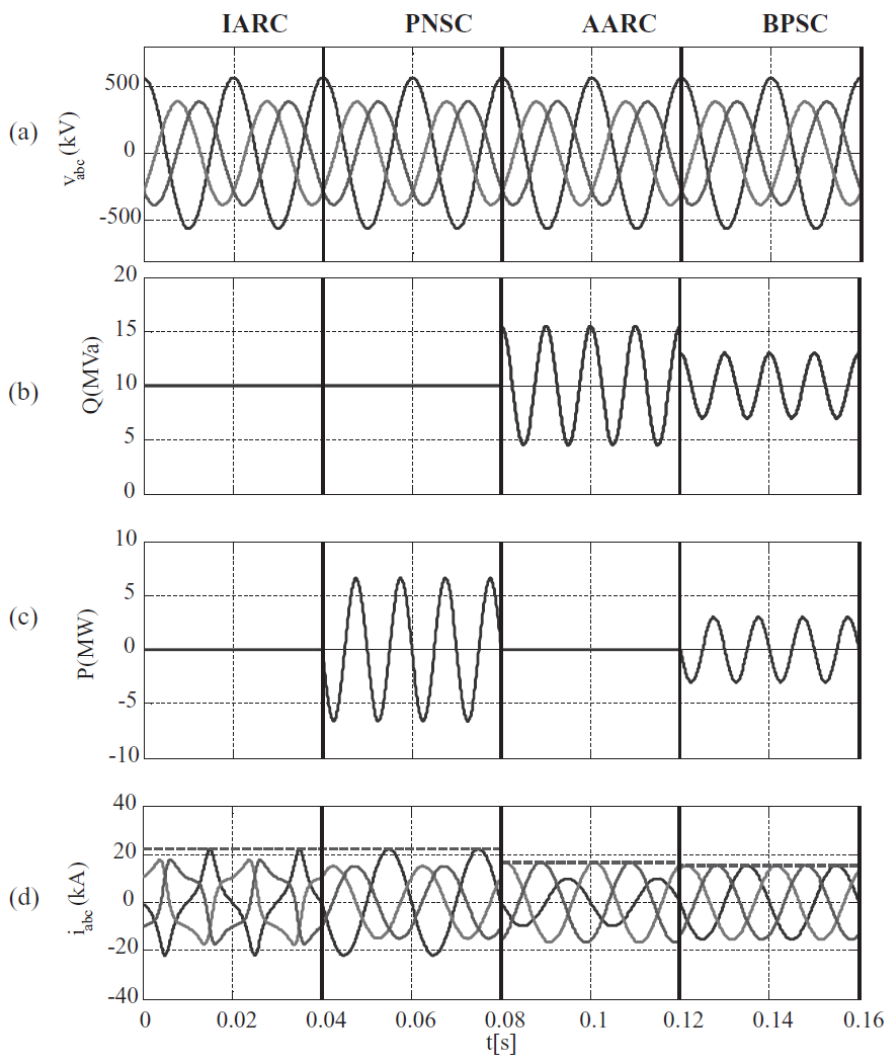


Рис. 2. Миттєві величини параметрів мережі при різних стратегіях керування

З представленого аналізу можна зробити висновок, що стратегії, які досягають кращих результатів щодо здатності генерації потужності, це в основному ті, які генерують синусоїдальні струми. Однак ці види стратегії викликають коливання потужності, і лише для PNSC і AARC можна знайти окремі випадки, коли ці коливання відсутні. З іншого боку, IARC є найвигіднішою стратегією з точки зору керованості потужністю, але, на жаль, дозволяє найменшу величину генерації потужності за незбалансованих умов, одночасно вводячи максимальну кількість гармонік серед представлених методів.

Алгоритм керування СТАТКОМ для стабілізації напруги в електричній мережі із сонячними та вітровими електростанціями повинен бути розроблений з урахуванням особливостей системи та поставлених цілей. Основною метою алгоритму є підтримання стабільного рівня напруги в електричній мережі шляхом контролю реактивної потужності.

Основні кроки алгоритму керування СТАТКОМ для стабілізації напруги можуть включати:

- **Моніторинг напруги:** Система має постійно моніторити рівень напруги в електричній мережі. Це може відбуватись за допомогою давачів, які вимірюють напругу на відповідних точках системи.
- **Визначення потреби в реактивній потужності:** Алгоритм повинен визначати, чи необ-

хідно додатково генерувати або споживати реактивну потужність для підтримки стабільного рівня напруги. Це може виконуватись на основі порівняння фактичного рівня напруги з заданим допустимим діапазоном.

- **Керування реактивною потужністю:** Залежно від визначеної потреби в реактивній потужності, алгоритм повинен встановлювати відповідне керування СТАТКОМ. Це може бути зміна кута зсуву фази, регулювання реактивного опору або використання інших методів керування, доступних у конкретній системі.

- **Постійна перевірка та корекція:** Алгоритм повинен постійно перевіряти рівень напруги та реактивної потужності і, у разі необхідності, коригувати керування СТАТКОМ для підтримки стабільної напруги.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто підходи та стратегії керування СТАТКОМ в мережах із вітровими та сонячними електростанціями, що дозволяють розробити алгоритм керування, який буде ефективним, швидким і точним у реагуванні на зміни у системі.

При розробці кінцевих алгоритмів потрібно враховувати фактори, такі як максимальні обмеження реактивної потужності та безпекові аспекти, щоб забезпечити надійну та стабільну роботу електричної мережі з вітровим генератором чи сонячною електростанцією.

Список літератури:

1. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Національний стандарт України. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.
2. IEC 61400-21-1:2019 – Wind energy generation systems – Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind turbines. 298 p.
3. IEC 61400-21-2:2023 – Wind energy generation systems – Part 21-2: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind power plants. 151 p.
4. IEC 61724-1:2021 – Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. 136 p.
5. IEC 61724-2:2016 – Photovoltaic system performance – Part 2: Capacity evaluation method. 27 p.
6. Ebrahim Mohammadi, Roohollah Fadaeinedjad, Hamid Reza Najji. Flicker emission, voltage fluctuations, and mechanical loads for small-scale stall- and yaw-controlled wind turbines. Energy Conversion and Management. Volume 165, 2018, p. 567-577. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.094>.
7. Redondo K, Gutierrez J J, Azcarate I, Saiz P, Leturiondo L A, S Ruiz de Gauna (2019) Experimental Study of the Summation of Flicker Caused by Wind Turbines. Energies. 12(12):2404. <https://doi.org/10.3390/en12122404>
8. Khan, Noman, Usman Farooq, Xiongfei Wang, Lars Helle, Pooya Davari. (2018) Evaluation of Flicker Measurement in Grid-connected Wind Turbine. In: IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 633-639. IEEE.
9. Wang, Chau-Shing et al. Enhancement of the Flickermeter for Grid-Connected Wind Turbines. Energies (2021): n. pag. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:239172379>
10. Bubshait, A.S., Mortezaei, A., Simoes, M., & Busarello, T.D. (2017). Power Quality Enhancement for a Grid Connected Wind Turbine Energy System. IEEE Transactions on Industry Applications, 53, 2495-2505.
11. Бурбело М. Й. Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 139–144. – ISSN 1997-9266.

12. О. Р. Лещенко, Ю. В. Лобода, М. Й. Бурбело, «Застосування статком для підвищення якості електроенергії», Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р.
13. P. D. Chung, “Evaluation of Reactive Power Support Capability of Wind Turbines”, Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 10, no. 1, pp. 5211–5216, Feb. 2020.
14. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodriguez. 2011. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-05751-3

Solomchak O.V., Nykolaychuk M.Ya., Solomchak A.O. ANALYSIS OF CONTROL STRATEGIES OF STATCOM IN POWER GRID WITH WIND AND SOLAR POWER PLANTS

The article deals with approaches, strategies and algorithms for controlling static reactive power compensator (STATKOM) in electrical networks with wind and solar power plants. An analysis of the negative impact of wind and solar power plants on the electrical network was carried out: voltage deviations and fluctuations, network stability, higher harmonics, power quality. Based on the analysis of the latest research and publications, the need to improve the algorithms of STATCOM control systems has been established. The advantages of using STATCOM to stabilize and improve the parameters of electric network modes, increase the reliability and efficiency of power supply: regulation and stabilization of voltage, compensation of higher harmonics, compensation of reactive power are given. Four STATCOM control strategies are considered: Instantaneous Active-Reactive Control (IARC), Positive- and Negative-Sequence Control (PNSC), Averaged control of active and reactive components (Average Active- Reactive Control (AARC), Balanced Positive-Sequence Control (BPSC). After evaluating various strategies for determining the reference current in the conditions of an unbalanced network, it can be stated that the main problems in calculating the reference current are focused on: the magnitude of active power fluctuations, the magnitude of reactive power fluctuations, and the harmonic content of the generated signal. It is shown that the strategies that achieve the best results in terms of power generation ability are mainly those that generate sinusoidal currents. However, these kinds of strategies cause fluctuations in power, and only for PNSC and AARC can we find isolated cases where these fluctuations are absent. On the other hand, IARC is the most advantageous strategy in terms of power controllability, but unfortunately allows the lowest amount of power generation under unbalanced conditions while introducing the maximum number of harmonics among the methods presented.

Key words: STATKOM, electrical network, solar power plants, wind power plants, voltage quality, stability, control, mode modeling.