

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.013>**МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ЗАДЛЯ УСУНЕННЯ ГАРМОНІК У СИСТЕМАХ
ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО
ЖИВЛЕННЯ**

І.А. Шаповал^{1*}, докт. техн. наук, **В.М. Михальський**^{1**}, член-кор. НАН України,
М.Ю. Артеменко^{2***}, докт. техн. наук, **В.В. Чопик**^{1****}, канд. техн. наук, **С.Й. Поліщук**^{1*****},
канд. техн. наук

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

² – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

e-mail: shapoval@ied.org.ua

Система генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення зі змінною швидкістю є найпопулярнішою системою у вітроенергетичній галузі. У такому генераторі статор приєднано безпосередньо до мережі, тоді як ротор приєднано до мережі за допомогою напівпровідникового перетворювача. Низька якість електроенергії збільшує енергетичні та економічні втрати, призводить до експлуатаційних проблем її виробництва. У ряді публікацій йдеться про покращення якості електроенергії, зокрема, про методи усунення гармонік для системи генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення. Критична оцінка потрібна для того, щоб зробити вибір методу усунення гармонік для конкретного випадку. У статті представлено огляд різних методів керування для усунення гармонік у системах генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення. Розглянуто різні стратегії, які використовуються як в автономних системах, так і в режимі приєднання до мережі. Під час розгляду методів керування для усунення гармонік було зазначено їхні різні характеристики, а також переваги та недоліки кожного з методів. Бібл. 53, рис. 6.

Ключові слова: система генерування електроенергії, усунення гармонік, якість електроенергії, машина подвійного живлення.

Надмірне використання традиційних джерел, як-от вичопне паливо, спричиняє екологічні проблеми, такі як забруднення, глобальне потепління тощо. Зменшення резервів звичайних джерел, прискорене збільшення попиту на електроенергію та дедалі вища вартість вичопного палива є однією з причин розвитку та збільшення використання відновлюваних джерел енергії [1–3]. Оскільки такі установки, як сонячні електростанції та вітроелектростанції (ВЕС), можуть розташовуватися безпосередньо поруч із споживачами й віддавати енергію до наявних електричних мереж низької або середньої напруги з мінімальними втратами, їх, на відміну від джерел централізованої генерації, називають джерелами розосередженої генерації [4]. У країнах Європи частка розосередженої генерації в загальному балансі вже досягла 15 %. Водночас в окремих країнах цей показник досить сильно відрізняється: від 6 % у Румунії до 45 % у Данії. В цьому відношенні енергія вітру є одним з найбільш перспективних джерел електроенергії в сучасному світі.

Розосереджене генерування є відповіддю на щораз вищий попит на електроенергію та загострення екологічних проблем. Серед альтернативних джерел електроенергії вітроенергетика є однією з найбільш перспективних технологій.

© Шаповал І.А., Михальський В.М., Артеменко М.Ю., Чопик В.В., Поліщук С.Й., 2022

ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0002-9107-5061>, **<https://orcid.org/0000-0002-8251-3111>,

<https://orcid.org/0000-0001-9341-9238>, *<https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>,

*****<https://orcid.org/0000-0002-6978-2747>

У розвинених країнах за останні десять років потужність вітрогенераторів зростала на рівні від 20 до 30 % [5, 6]. Країнами з найвищою встановленою потужністю вітрогенераторів є Сполучені Штати, Німеччина, Китай та Іспанія [7, 8].

Треба зазначити, що показники якості напруги електропостачання в мережах із ВЕС значною мірою пов'язані з конструкцією генераторів вітроагрегатів. Якщо розглянути історію розвитку ВЕС, то на її першому етапі, коли частка ВЕС у загальному обсязі генерованої електроенергії була незначною, вимоги до генераторів ВЕС стосовно забезпечення стійкості системи електропостачання не висувались. Малопотужні вітроагрегати виконувалися з використанням асинхронних генераторів, до характеристик яких не висувалося окремих вимог щодо дотримання показників якості генерованої електроенергії. У той час проблема спотворення форми напруги в електричних мережах не була актуальною. Актуальними проблемами на першому етапі розвитку ВЕС були тільки зміна напруги в мережі під час підключення й відключення вітроагрегатів, а також споживання ними реактивної потужності з мережі.

Наприкінці 20-го століття радикальні поліпшення технології ВЕС привели до зростання кількості установок вітроагрегатів. Наприклад, лопаті, які раніше були виготовлені з листового металу, тепер виготовляються зі скловолокнистого композиту; генератори постійного струму та синхронні генератори були замінені на асинхронні генератори; було впроваджено цифрове керування; розмір турбіни збільшився, змінивши значення середньої номінальної потужності з 50 кВт на початку 1980-х років до 1,5 МВт у 2006 році; розміри лопатей зросли з 8 м у 1980-х роках до більше ніж 70 м у багатьох сучасних системах [9].

З огляду на досягнення в силовій електроніці та методах керування такі застосування, як компенсація реактивної потужності, статичні перемикачі, накопичення енергії, генерування електроенергії за змінної швидкості, керування напругою та підтримка динамічної реактивної потужності зазвичай зустрічаються в сучасних ВЕС [10, 11]. Унаслідок вищезазначених поліпшень вартість одного вольт-амперу ВЕС знижується, а надійність, ефективність та продуктивність зростають [12].

Коли ВЕС були невеликими та їхній вплив на роботу мережі був мінімальним, правила, що регулюють генерування із застосуванням вітру, були пом'якшені для стимулювання розвитку [12]. Протягом останніх років збільшення кількості ВЕС показало, що відсутність правил є загрозою для стабільності та якості електроенергії мережі [10, 13, 14]. Як наслідок, вимоги до взаємозв'язку ВЕС із мережею стають суворішими та більш схожими на ті, що зроблені для традиційних джерел генерування [15], а ВЕС переходять від простого енергоносія до електростанції, яка забезпечує значну підтримку мережі.

Сучасні технології керування дають змогу експлуатувати ВЕС нижче максимальної потужності протягом більшої частини часу, забезпечуючи за таких умов виконання допоміжних завдань для мережі [16, 17].

Аналіз опублікованої літератури засвідчує, що різні типи методів усунення гармонік не розглядаються критично за один раз. Отже, доцільно переглянути, зібрати та представити ці методи у всеосяжній формі. **Метою статті** є огляд різних доступних методів керування задля усунення гармонік у системах генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення (МПЖ).

МПЖ може працювати в таких режимах: у режимі підключення до мережі [18–21], а також в автономному режимі [22–29]. У випадку використання СГЕ з підключенням до мережі основна увага в роботі та методах керування полягає в моделюванні МПЖ [30], регулюванні активної та реактивної потужностей [19, 31, 32], здатності витримувати провали в напрузі мережі [18, 31] і компенсації несиметрії мережі [19, 22, 31–33]. Але, щоб знати повний потенціал МПЖ, слід розглянути методи керування для автономного режиму роботи. Це пояснюється тим, що робота системи керування в такому випадку дуже важлива для різних методів керування, величини гармонічних спотворень і спричинених нелінійних та несиметричних навантажень.

Методи зменшення гармонік для автономних МПЖ із нелінійними навантаженнями. Узагальнена модель автономної системи МПЖ із нелінійним навантаженням, що

складається з трифазного некерованого мостового випрямляча, що живить навантаження постійного струму, показана на рис. 1.

Зазвичай у таких умовах основна частота напруги статора ω_s , кратна $6n \pm 1$ ($n=1,2,\dots$). Наявність таких гармонік спричиняє шкідливий

вплив на якість напруги статора МПЖ. Це погіршує інші показники навантаження, які підключені до МПЖ. Нелінійний струм i_N генерується усіма нелінійними навантаженнями, пов'язаними з МПЖ, що є основною причиною виникнення гармонік.

З огляду на автономний режим роботи МПЖ з несиметричними навантаженнями у [22, 28, 29] були запропоновані відповідні алгоритми, щоб компенсувати несиметричні вихідні напруги.

Алгоритм компенсації струму зворотної послідовності.

Керування МПЖ за допомогою мережевого інвертора (МІ) (рис. 1) у ланці ротора з урахуванням несиметричного навантаження в автономному режимі досліджено в [22].

У цьому випадку генерований струм зворотної послідовності призводить до пульсацій моменту й проблем перегрівання в машині. Система векторного керування МІ показана на рис. 2, де напруга в ланці постійного струму регулюється струмом i_{df}^+ , а реактивна потужність навантаження регулюється струмом i_{df}^+ . Струми зворотної послідовності МІ регулюються так:

$$i_{dqf}^{*-} = -i_{dqL}^- = -(i_{dqS}^- - i_{dqf}^-). \quad (1)$$

У стаціонарному стані пульсації крутного моменту видаляються, коли $i_{dqf}^- = -i_{dqL}^-$ та $i_{dqS}^- = 0$, тобто відповідний струм статора дорівнює нулю. Струм зворотної послідовності, що формується перетворювачем МІ, регулюється й доводиться до нуля. Це виключає пульсації крутного моменту для досягнення бажаної компенсації. Але водночас жодних нових модифікацій перетворювача в роторній ланці не вводиться.

Пі-резонансний (Пі-Р) метод керування з компенсацією струму.

Для усунення несиметрії напруги статора в працях [28, 29] запропоновано новий модифікований алгоритм керування. Цей алгоритм керування використовує Пі-резонансний (Пі-Р) регулятор у перетворювачі РІ, що має додатну обертову систему координат. Цей регулятор керує як прямою, так і зворотною послідовностями струму без послідовного розкладання. На рис. 3 наведено блок-схему запропонованого МПЖ в автономному режимі з методом пом'якшення гармонік напруги статора. У цьому випадку величина напруги статора безпосередньо регулюється заданим значенням $|v_s^*|$. Амплітуда напруги статора $|v_s|$ є похідною від компонентів прямої послідовності, тобто

$$|v_s| = \sqrt{v_{ds}^{+2} + v_{qs}^{+2}}.$$

У цьому випадку компоненти зворотної послідовності усуваються за допомогою цього гібридного (Пі-Р) алгоритму керування в перетворювачі РІ, таким чином балансує напругу статора. Проте якість вихідної напруги статора потребує поліпшення, оскільки вона містить гармоніки напруги низького порядку, тобто 5-ї та 7-ї. Це найбільш поширені та шкідливі гармонічні компоненти.

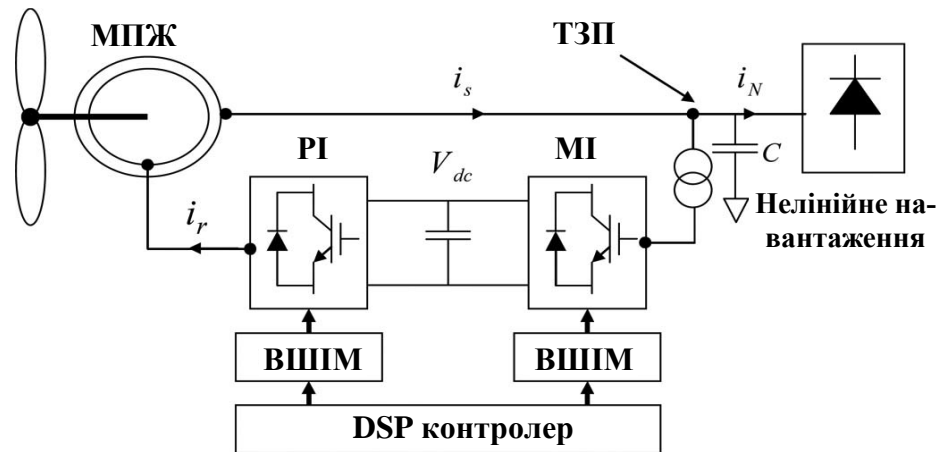


Рис. 1

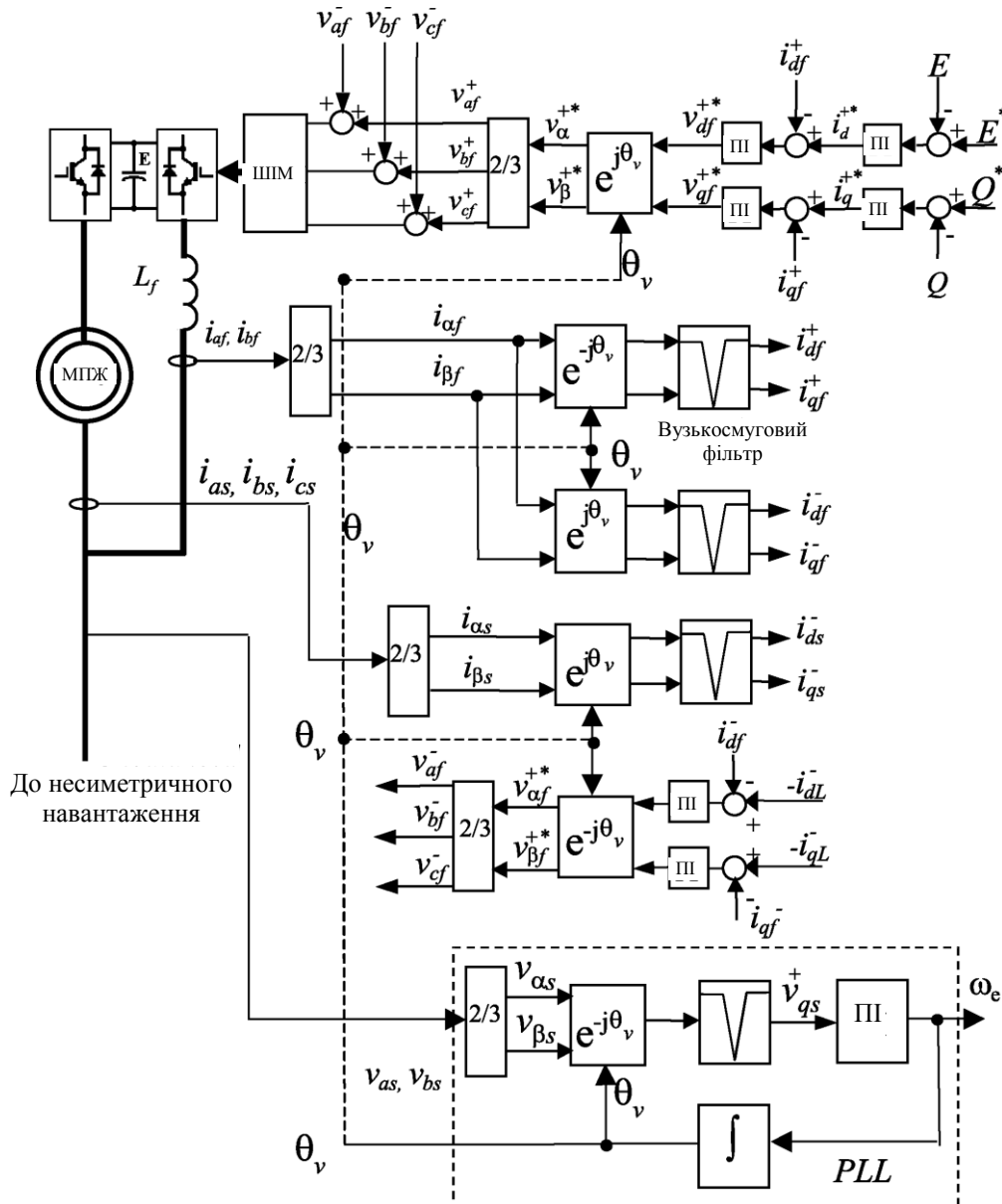


Рис. 2

Алгоритм векторного керування з теорією активної фільтрації. У роботі [26] пропонується автономна МПЖ із векторним алгоритмом керування та використанням теорії активної потужності. Першочерговим завданням такого алгоритму є підтримання постійної напруги та частоти на виході генератора незалежно від зміни швидкості. У цьому випадку гармонічні компоненти зменшуються шляхом застосування теорії фільтрації активної потужності в перетворювачі МІ.

У роботі [26] представлено схему керування роторним інвертором (PI) (рис. 1), де регулятори напруги та частоти в поєднанні допомагають регулювати статорну напругу і частоту. Така схема діє як частина частотного контуру керування. Впроваджуючи концепцію роботи активних фільтрів у перетворювач МІ, ця схема допомагає розв'язувати проблему якості електроенергії. У ній паралельні активні фільтри використовуються разом із керуванням перетворювачем МІ. Основним принципом паралельного активного фільтра є те, що гармонічний струм навантаження компенсується перетворювачем МІ.

Модифікована стратегія керування струмом ротора на основі Ш-Р. У [35] представлено нову систему керування струмом ротора МПЖ, яка реалізується в системі координат $d-q$. Цей алгоритм також виключає 5-у та 7-у гармоніки напруги в точці загального приєднання (ТЗП) для нелінійних навантажень, обладнаних автономною системою МПЖ. У

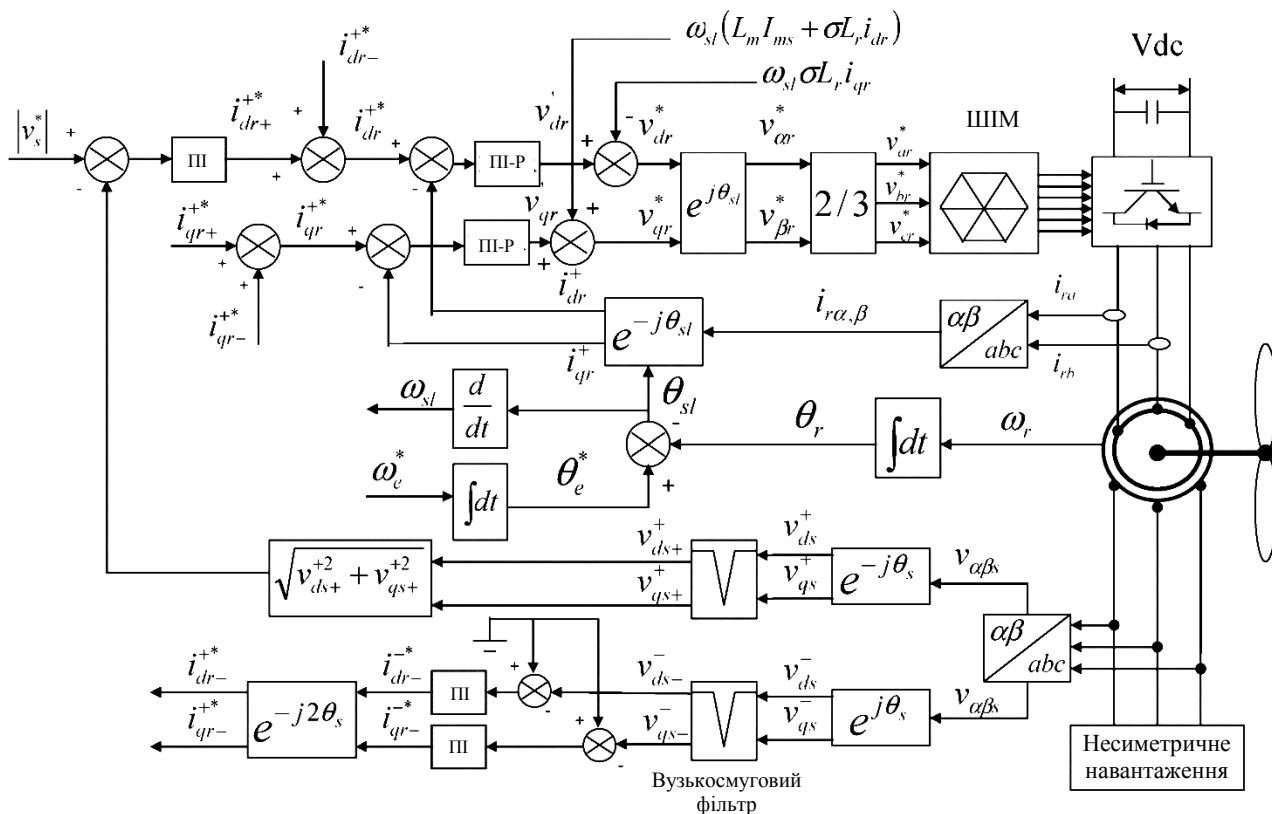


Рис. 3

цій системі координат п'ята та сьома гармоніки стають однаковим порядком шостих гармонік. Потім вони усуваються модифікованим регулятором струмів ротора на основі ПІ-Р регулятора. Перевага такої структури полягає в тому, що один регулятор струму ротора виключає пару як 5-у гармоніку зворотної послідовності та 7-у гармоніку прямої послідовності в ТЗП. Це дає змогу використовувати половини резонансних компенсаторів порівняно з випадком, який застосовується в стаціонарній системі координат, що в цілому спрощує систему керування.

Система керування перетворювачами автономної системи МПЖ забезпечує необхідну вихідну напругу для компенсації згаданих раніше гармонік. У цій роботі розглянуто регулятор ПІ-Р типу, застосований у РІ на основі методики пом'якшення гармонік для МПЖ. Генерування належного сигналу напруги V_s для компенсації нелінійного падіння напруги V_{NS} є метою цього регулятора. Таким чином, без пасивного фільтра відбувається генерування синусоїдальної форми напруги.

Для регулювання струму в замкнутому контурі відсутні вимоги до розкладання на пряму й зворотну послідовності гармонік у вимірних струмах ротора. Зрештою це мінімізує затримку часу керування і покращує загальну продуктивність системи керування. Єдиним недоліком цього є використання двох резонансних контурів, необхідних для кожної з $6n \pm 1$ ($n=1,2,\dots$) гармонічних складових. Тому один резонансний контур може вилучити лише гармонічну складову відповідної резонансної частоти.

Метод повторюваного керування. Метод, що базується на керуванні прогнозним струмом, був запропонований у [36] з метою поліпшення реакції МПЖ в умовах несиметрії напруги статора. Однак гармонічно спотворені напруги статора не досліджено.

У роботі [37] усунення несиметрії та гармонічних складових статорної напруги автономної МПЖ здійснюється за допомогою пропорційно-інтегральної повторюваної методики. ПІ-контролери регулюють фундаментальні складові напруги статора в синхронній системі координат. Для усунення несиметрії та гармонічних компонентів застосовується повторювана методика керування. У системі керування РІ ПІ-регулятори використовуються для отри-

мання заданих компонентів напруги ротора $V_{r,d}^*$ і $V_{r,q}^*$ після визначення заданого струму ротора.

Пропорційно-інтегральний повторюваний регулятор (ПІ-ПР) є необхідним для мінімізації гармонік і компонентів зворотної послідовності фаз напруги статора. Це бажана умова, оскільки запропонована система створює менше складностей для обчислення внаслідок використання єдиного регулятора для усунення несиметрії та гармонічних компонентів. Система відрізняється від інших ПІ або ПІ-Р регуляторів, де вузли керування повинні бути змінені в разі використання різних систем координат.

Методи зниження рівня гармонічних складових для МПЖ, приєднаної до мережі.

Далі розглядаються різні методи пом'якшення впливу гармонік на енергосистему для СГЕ на основі МПЖ, підключених до мережі.

Метод ізоляції гармонік. У роботах [38, 39] запропоновано новий підхід для одночасного виокремлення гармонік струму й генерування електроенергії в СГЕ на основі МПЖ, приєднаної до мережі. У такому випадку можлива активна фільтрація, оскільки регулюються струми ротора. Швидкість МПЖ Ω_g , усунення гармонік струму та регулювання реактивної потужності статора θ_s керуються перетворювачем ПІ, тоді як передавання активної потужності між ланкою постійного струму та мережею керується за допомогою ПІ. У цьому випадку, враховуючи високий результат впливу ПІ для пом'якшення гармонічних струмів, компоненти гармонічного струму виокремлюються за допомогою фільтра селективного смугового пропускання, як показано на рис. 4. Це

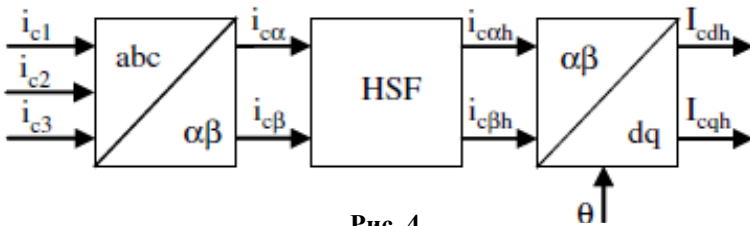


Рис. 4

вимагає лише вимірювання струму. Трифазний нелінійний регулятор струму вибирається в результаті гібридизації між фіксованим контролером смуги гістерезису й структурами ШІМ контролера струму.

Інтегрований метод МПЖ генератор/активний фільтр (IDEA).

Автори в роботі [40] зробили наголос на дослідженні бездавачевого полеорієнтованого керування МПЖ генератором/активним фільтром для СГЕ. Такий тип керування може одночасно відбирати максимальну енергію вітру й підвищити якість електроенергії шляхом пом'якшення найбільш серйозних і проблемних наявних гармонік, відмінних від основної гармоніки струмів нелінійних навантажень.

У цій стратегії керування струми основної гармоніки так само, як і струми вищих гармонік, контролюються за допомогою регуляторів у орієнтованій за полем статора системі координат. На рис. 5 показано блок-схему конфігурації системи.

За допомогою давачів струму вимірюється струм мережі за підключення нелінійних

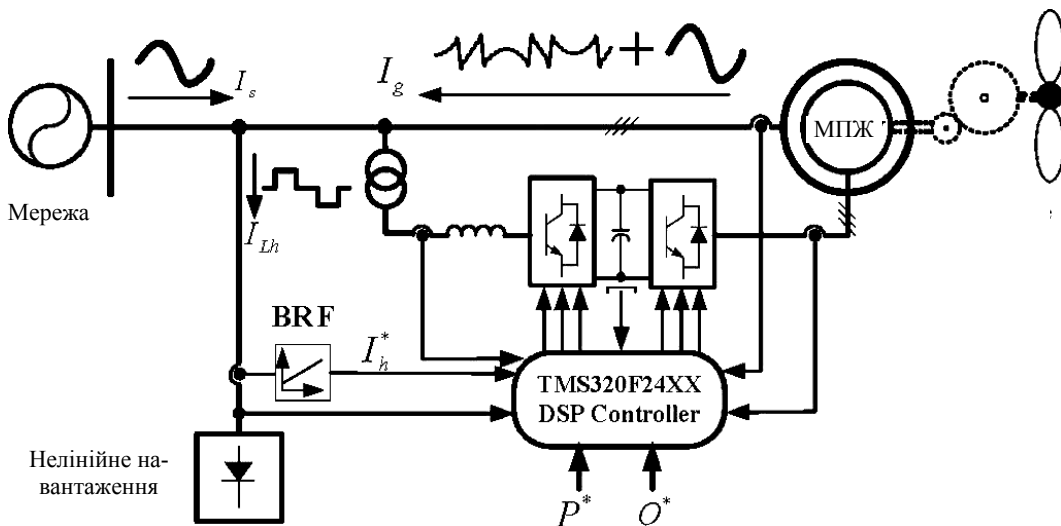


Рис. 5

навантажень. Таким чином, формується завдання на компенсацію гармонік струму для перетворювача ПІ. Аналогічно завдання активної потужності P^* встановлюється відповідно до характеристик вітрової турбіни та швидкості вітру. Згідно з вимогами підключення до мережі формується завдання реактивної потужності Q^* . Збудження МПЖ досягається за допомогою перетворювача ПІ.

Гармоніки струму, генеровані нелінійним навантаженням, будуть компенсовані генерованими гармонічними складовими. Активна й реактивна потужності регулюються струмом основної гармоніки, таким чином, струм мережі залишається чисто синусоїдальним. У цьому дослідженні не розглядається компенсація реактивної потужності, а також перевищення потужності роторного перетворювача.

Метод активної фільтрації.

У роботі [41] запропоновано стратегію керування для використання функції фільтрації за допомогою перетворювача ПІ до його максимальної потужності. Такий регулятор керує функціональними пріоритетами СГЕ між максимальним підвищенням активної потужності та якістю електроенергії. Активному виробництву електроенергії надається найвищий пріоритет над поліпшенням якості електроенергії. Після цього наступним пріоритетом буде корекція коефіцієнта потужності порівняно з гармонічною компенсацією. Нарешті, можливість фільтрації за допомогою ПІ використовуються до максимального рівня без будь-якого перевищення номінальних значень за допомогою чітко визначеної процедури. Крім того, для керування МІ використовується регулятор нечіткої логіки для підтримки плавності напруги ланки постійного струму. Таким чином, між мережею та МІ формується синусоїдальний струм.

Ідентифікація заданого струму гармонік здійснюється за допомогою різних методів, які можуть бути розподілені на дві категорії:

- часова область;
- частотна область [42–44].

Існують два способи керування компенсацією гармонічних складових струму:

- а) перший спосіб полягає в тому, щоб спочатку вибрати потрібну гармоніку, а потім внести її в регулятор струму з великою пропускнуою здатністю;
- б) другий спосіб – це безпосереднє використання селективного регулятора струму (регулятор резонансного струму або узагальнений інтегратор) для керування гармонічними компонентами [45–47].

У цьому випадку похибка швидкості e та її зміна Δe дає заданий струм i_{qref} шляхом налаштування регулятора нечіткої логіки для керування перетворювачем ПІ. Теорія миттєвої потужності $p-q$, згадана в літературі [42], є відомим методом, який можна легко застосувати для часткової селективної компенсації струму гармоніки.

Еквівалентні задані струми ротора i_{drhref} , i_{qrhref} виводяться з i_{ldh} , i_{lqh} , які є результуючими заданими струмами гармонік. Отримано рівняння:

$$\begin{cases} I_{drhref} = -\frac{L_s}{M} i_{dh}, \\ I_{qrhref} = -\frac{L_s}{M} i_{qh}. \end{cases} \quad (2)$$

Результуючі гармонічні струми ротора компенсуються протилежним знаком струмів i_{drhref} , i_{qrhref} . Таким чином, завдання на формування активних (i_{qref}) і реактивних (i_{dref}) струмів ротора додаються до результуючих завдань гармонік струмів ротора, заданими як:

$$\begin{cases} I_{drhref1} = \frac{L_s}{M} i_{ldh}, \\ I_{qrhref1} = \frac{L_s}{M} i_{lqh}. \end{cases} \quad (3)$$

Додаткове поліпшення гармонічного складу здійснюється з використанням паралельного активного фільтра. У такому випадку розраховується миттєва потужність $p-q$ для вилу-

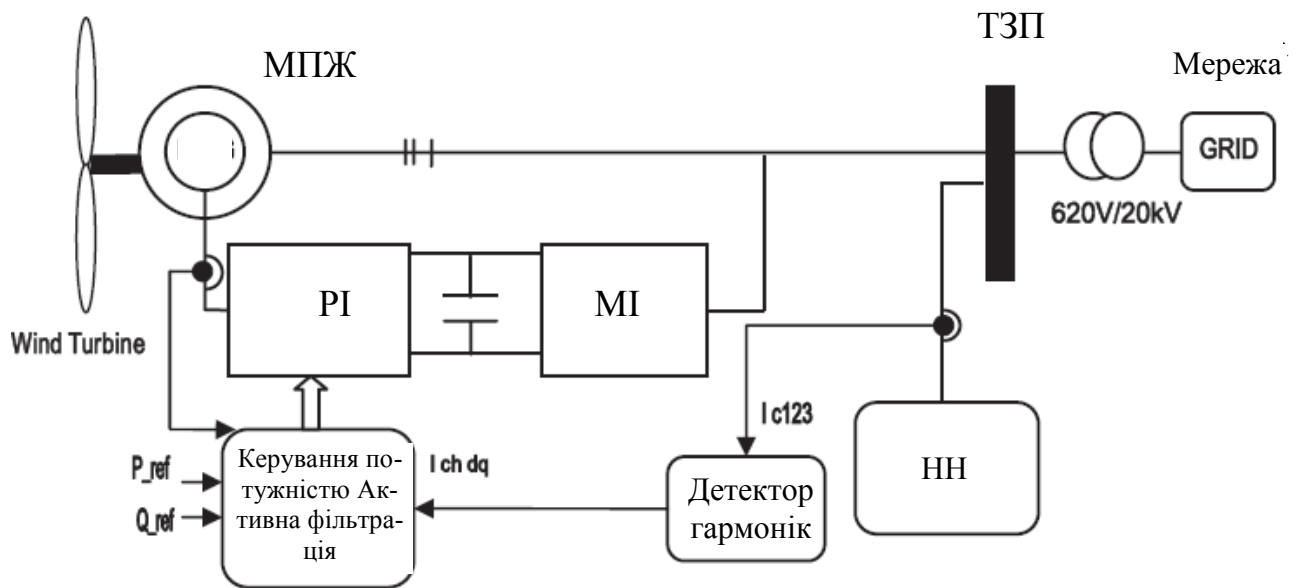


Рис. 6

чення гармонік струму навантаження з використанням теорії $p-q$ миттєвої потужності, як це запропоновано в [48]. Запропоновано схему для синхронізації $d-q$ струмів із використанням механічної кутової швидкості ротора. Недоліками цього підходу є те, що він потребує вимірювань значень як напруги, так і струму, і селективне виявлення гармонік не допускається. Такий фільтр поглинає весь можливий спектр гармонік у рамках швидкодії, яку він забезпечує.

Фільтрація гармонік струму мережі з використанням високоселективного смугового фільтра (ВСФ). У цьому методі вимірюються гармонічні складові струму 5-го, 7-го і 11-го порядку, генеровані нелінійними навантаженнями, підключеними до ТЗП, і за допомогою ВСФ всі гармонічні компоненти відокремлені від основної гармоніки [49–53]. Регулятор струму з фіксованою частотою показано на рис. 6 [49]. Система складається з контура вимірювання гармонік разом з контуром векторного керування потужністю.

Загальне рівняння ВСФ (фільтра високочастотної смуги пропускання), налаштованого на частоту, що підлягає вилученню:

$$H(s) = \frac{I_{ca\beta}(s)}{I_{ca\beta}} = K \frac{(s+k) + jw_c}{(s+k)^2 + jw_c^2}, \quad (4)$$

де K – стала величина; w_c – циклічна частота пульсацій компоненти сигналу, що підлягає вилученню.

Висновки. У статті представлено огляд різних методів керування для усунення гармонік у системах генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення. Розглянуто різні стратегії, які використовуються як в автономних системах, так і в режимі приєднання до мережі. Під час розгляду методів керування для усунення гармонік було зазначено їхні різні характеристики, а також переваги та недоліки кожного з методів.

Із наведеного вище огляду різних підходів до методів мінімізації гармонічних складових струму мережі можна зробити висновки з точки зору кожної методики, їхніх характеристик, переваг і недоліків. Основною метою методів усунення гармонік є зменшення гармонічних компонентів струму, наявних у реальній енергосистемі. Для розуміння загальних можливостей МПЖ виконано огляд стратегій керування МПЖ в автономному режимі роботи. Це пояснюється тим, що на результативність керування за такої умови значною мірою впливають: методи керування, нелінійні або незбалансовані навантаження й гармонічні спотворення. Метод компенсації струму зворотної послідовності, застосований для керування мережевим інвертором МПЖ, представлено за несиметрії навантаження для автономного режиму роботи. Проблема крутного моменту, що пульсує, зменшується, коли струм статора стає нульовим. Проте не зазначено жодної модифікації PI. Розглядається інший метод керування

гібридної (ПІ-Р) компенсації струму, застосований на РІ із заданою системою координат. Він регулює компоненти як зворотної, так і прямої послідовності без почергового розкладання. Вихідна напруга статора потребує поліпшення через наявність гармонік нижчого порядку. Векторна система керування із застосуванням теорії активної фільтрації діє як частина частотного контура. Паралельні активні фільтри переважно інжектують струми гармонік навантаження. Цей тип керування МІ контролює якість електроенергії, але за регулювання величин змінного струму можуть виникати стаціонарні похибки амплітуди та фази. Розглянуто вплив нелінійного навантаження на якість вихідної напруги статора в ТЗП за різних методів керування. Зазначено залежність від модифікованого регулятора струму ротора ПІ-Р. Також відзначено, що відбувається усунення 7-ї гармоніки прямої послідовності та 5-ї гармоніки зворотної послідовності напруги статора в ТЗП без розкладання виміряного значення струму ротора. Однак цей метод не розглядає питання про забезпечення будь-якого рішення для спотворення струму статора i_{sa} , який обумовлений струмом нелінійного навантаження i_{Na} . Методика ПР усуває несиметрію й гармонічні компоненти. Проте точно й швидко виявлення гармонічних компонентів, що використовують цю стратегію, все ще залишається невирішеним завданням.

Розглянуто різні стратегії мінімізації гармонік струму мережі для ВЕС на основі МПЖ, підключених до мережі. Керування швидкістю МПЖ, реактивною потужністю статора та мінімізація гармонік відбувається за допомогою РІ. Регулювання струмів ротора робить можливим активну фільтрацію за допомогою МПЖ. Метод IDEA усуває гармонічні струми нелінійних навантажень. Тому система керування одночасно забезпечує максимальний відбір енергії вітру та покращує якість електроенергії. У цьому методі не розглядається перевищення номінальних параметрів РІ та компенсації реактивної потужності, а забезпечується баланс між максимальним виробництвом активної потужності та якістю електроенергії. Така система керування надає перевагу виробництву активної потужності над якістю електроенергії, а також надає перевагу компенсації реактивної потужності над активною фільтрацією. Мінімізація гармонік за допомогою паралельного активного фільтра використовує теорію миттєвої потужності $p-q$ для розрахунку миттєвих потужностей $p-q$, яка необхідна для вилучення гармонік струму навантаження. Цей метод потребує виміряних значень напруги та струму, а селективне виявлення гармонік не допускається. У фільтруванні гармонічних струмів мережі з використанням високоселективного смугового фільтра основною роботою є генерування електроенергії з подальшою фільтрацією гармонічних струмів мережі. Метод використовує ШІМ та непряме векторне керування для генерування активної та реактивної потужностей. Статор МПЖ і мережевий інвертор з'єднуються з нелінійним навантаженням, і застосовується ізолювання гармонічних складових залежно від високоселективної фільтрації.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробка наукових основ та принципів побудови напівпровідникових перетворювачів з розширеними функціональними можливостями і методів керування ними в системах з джерелами розосередженої генерації» (шифр «АДАПТЕР»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 09.07.2019 р., протокол № 12. Державний реєстраційний номер роботи 0120U002005. КПКВК 6541030.

1. Saber A.Y., Venayagamoorthy G.K. Efficient utilization of renewable energy sources by gridable vehicles in cyber-physical energy systems. *IEEE Systems Journal*. Sept. 2010. Vol. 4. No. 3. Pp. 285–294. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2010.2059212>
2. Nikolova S., Causevski A., Al-Salaymeh A. Optimal operation of conventional power plants in power system with integrated renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*. Jan. 2013. Vol. 65. Pp. 697–703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.035>
3. Böttger D., Götz M., Theofilidi M., Bruckner T. Control power provision with power-to-heat plants in systems with high shares of renewable energy sources - An illustrative analysis for Germany based on the use of electric boilers in district heating grids. *Energy*. 2015. Vol. 82. Pp. 157–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.022>
4. Gianfranco Chicco, Marialaura Di Somma, Giorgio Graditi, Chapter 1 - Overview of distributed energy resources in the context of local integrated energy systems, Editor(s): Giorgio Graditi, Marialaura Di Somma, *Distributed Energy Resources in Local Integrated Energy Systems*, Elsevier. 2021. Pp. 1–29, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823899-8.00002-9>.

5. Smith J.C., Parson B. What does 20% look like?. *IEEE Power and Energy Magazine*. Nov. - Dec. 2007. Vol. 5. No. 6. Pp. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPE.2007.906565>
6. Chen Z., Blaabjerg F. Wind energy: The world's fastest growing energy source. *IEEE Power Electronics Society Newsletter*. 2006. Vol. 18. No. 3. Pp. 15–19. DOI:
7. Andrews J., Jolley N. *Energy Science - principles, technologies and impacts*. Oxford University Press, 116-117 High St, Oxford, U.K., 2007.
8. World Wind Energy Association. World wind energy report 2017. Tech. Rep. URL: <https://wwindea.org/blog/category/statistics/>
9. Thresher R., Robinson M., Veers P. To capture the wind. *IEEE Power and Energy Magazine*. Nov.-Dec. 2007. Vol. 5. No. 6. Pp. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPE.2007.906304>
10. Muljadi E., Butterfield C.P., Chacon J., Romanowitz H. Power quality aspects in a wind power plant. Proceedings of Power Engineering Society General Meeting. 2006. Montreal, Canada. 18-22 June 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709244>
11. Wachtel S., Marques J., Quitman E., Schellschmidt M. Wind energy converters with FACTS capabilities and the benefits for the integration of wind power plants into power systems. Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC). Milan. May 7-10, 2007. Pp. 1761–65.
12. Blaabjerg F., Chen Z. *Power Electronics for Modern Wind Turbines*. Synthesis Lectures on Power Electronics. Morgan & Claypool, U.S., 2006.
13. Walling R.A., Saint R., Dugan R.C., Burke J., Kojovic L.A. Summary of distributed resources impact on power delivery systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July 2008. Vol. 23. No. 3. Pp. 1636–1644. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.909115>
14. Smith J.C., Milligan M.R., DeMeo E.A., Parsons B. Utility wind integration and operating impact state of the art. *IEEE Transactions on Power Systems*. Aug. 2007. Vol. 22. No. 3. Pp. 900–908. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901598>
15. Kalich C., King J., Milligan M.R., Murlay C., Oakleaf B., DeMeo E.A., Jordan G.A., Schuerger M.J. Accomodating wind's natural behavior. *IEEE Power and Energy Magazine*. Nov.-Dec. 2007. Vol. 5. No. 6. Pp. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPE.2007.906562>
16. Hansen A.D., Michalke G., Sorensen P., Lund T. Co-ordinated voltage control of DFIG wind turbines in uninterrupted operation during grid faults. *Wind Energy*, 2007. Vol. 10. No. 1. Pp. 51–68. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.207>
17. Prodanovic M., De Brabandere K., Van den Keybus J., Green T., Driesen J. Harmonic and reactive power compensation as ancillary services in inverter-based distributed generation. *IET Generation, Transmission & Distribution*. March, 2007. Vol. 1. No. 3. Pp. 432–38. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20060064>
18. Peña R., Cárdenas R., Proboste J., Asher G., Clare J. Sensorless control of doubly-fed induction generators using a rotor-current-based MRAS observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronivs*. Jan. 2008. Vol. 55. No. 1. Pp. 330–339. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.896299>
19. Abad G., Rodriguez M.A., Iwanski G., Poza J. Direct power control of doubly-fed induction-generator-based wind turbines under unbalanced grid voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 25. Pp. 442–452. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2027438>
20. Anirban Mishra, Kalyan Chatterjee Harmonic analysis and attenuation using LCL-filter in doubly fed induction generator based wind conversion system using real time simulation based OPAL-RT. *Alexandria Engineering Journal*. Vol. 61. Issue 5. 2022. Pp. 3773–3792. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.079>
21. Sharadbhai P.T. and Gupta S. Artificial Neural Network Based Control of Doubly Fed Induction Generator For Active Filtering Capabilities. 2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE). 2021. Pp. 107–112. DOI: <https://doi.org/10.1109/RDCAPE52977.2021.9633346>
22. Peña R., Cárdenas R., Escobar E., Clare J., Wheeler P. Control system for unbalanced operation of stand-alone doubly fed induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. June 2007. Vol. 22. No. 2. Pp. 544–545. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.895393>
23. Fayssal Amrane, Bruno Francois, Azeddine Chaiba Experimental investigation of efficient and simple wind-turbine based on DFIG-direct power control using LCL-filter for stand-alone mode. *ISA Transactions*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.07.008>
24. Sabir B., Rawat V.K., Faizan M. and Tahir M. Analysis of Generated Harmonics in DFIG Driven by Wind Turbine during Linear & Non-Linear Load. 2021 *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. 2021. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCI50826.2021.9402269>
25. Vishal, Mishra A. and Chatterjee K. Power Quality Enhancement of DFIG based Wind Turbine by Active Filter Implementation. 2019 *International Conference on Ubiquitous and Emerging Concepts on Sensors and Transducers (UEMCOS)*. 2019. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/UEMCOS46508.2019.9221614>
26. Jain A.K., Ranganathan V.T. Wound rotor induction generator with sensorless control and integrated active filter for feeding nonlinear loads in a stand-alone grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jan. 2008. Vol. 55. No. 1. Pp. 218–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911196>

27. Forchetti D.G., Garcia G.O., Valla M.I. Adaptive observer for sensorless control of stand-alone doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Oct. 2009. Vol. 56. No. 10. Pp. 4174–4180. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2014907>
28. Phan V.T., Kwak S.-H., Lee H.-H. An improved control method for DFIG-based wind system supplying unbalanced stand-alone loads. Proceedings of the IEEE international symposium on industrial electronics. 2009. Pp. 1081–1086. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2009.5213104>
29. Phan V.-T., Lee H.-H., Chun T.-W. An improved control strategy using a PI-resonant controller for an unbalanced stand-alone doubly-fed induction generator. *Journal of Power Electronics*. Mar. 2010. Vol. 10. No. 2. Pp. 194–202. DOI: <https://doi.org/10.6113/JPE.2010.10.2.194>
30. Protsenko K., Xu D. Modeling and control of brushless doubly-fed induction generators in wind energy applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. May 2008. Vol. 23. No. 3. Pp. 1191–1197. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.921187>
31. Santos-Martin D., Rodriguez-Amenedo J.L., Arnalte S. Direct power control applied to doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Sept. 2008. Vol. 23. No. 5. Pp. 2328–2336. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2001907>
32. Zhou P., He Y., Sun D. Improved direct power control of a DFIG-based wind turbine during network unbalance. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009. Vol. 24. Pp. 2465–2474. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2032188>
33. Sheng Hu, Guorong Zhu Enhanced control and operation for brushless doubly-fed induction generator based wind turbine system under grid voltage unbalance. *Electric Power Systems Research*. Vol. 207. 2022. 107861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107861>
34. Tan K., Islam S. Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System without Mechanical Sensors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. June 2004. Vol. 19. No. 2. Pp. 392–399. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.827038>
35. Phan V.-T., Lee H.-H. Control strategy for harmonic elimination in stand-alone DFIG applications with nonlinear loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Sept. 2011. Vol. 26. No. 9. Pp. 2662–2675. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2123921>
36. Phan V.-T., Lee H.-H. Improved predictive current control for unbalanced stand-alone doubly-fed induction generator-based wind power systems. *IET Electric Power Applications*. Mar. 2011. Vol. 5. No. 3. Pp. 275–287. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2010.0107>
37. Wei F., Zhang X., Vilathgamuwa D.M., Choi S.S., Wang S. Mitigation of distorted and unbalanced stator voltage of stand-alone doubly fed induction generators using repetitive control technique. *IET Electric Power Applications*. Aug. 2013. Vol. 7. No. 8. Pp. 654–663. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2012.0317>
38. Gaillard A., Poure P., Saadate S., Machmoum M. Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation. *Renewable Energy*. June 2009. Vol. 34. No. 6. Pp. 1545–1553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.11.002>
39. Gaillard A., Poure P., Saadate S. Reactive power compensation and active filtering capability of WECS with DFIG without any over-rating. *Wind Energy*. Oct. 2010. Vol. 13. No. 7. Pp. 603–614. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/we.381>
40. Abolhassani M.T., Niazi P., Toliyat H.A., Enjeti P. Integrated Doubly Fed Electric Alternator/Active Filter (IDEA), a Viable Power Quality Solution, for Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. June 2008. Vol. 23. No. 2. Pp. 642–650. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914181>
41. Boutoubat M., Mokrani L., Machmoum M. Control of a wind energy conversion system equipped by a DFIG for active power generation and power quality improvement. *Renewable Energy*. 2013. No. 50. Pp. 378–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.058>
42. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May 1984. Vol. IA-20. No. 3. Pp. 625–630. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460>
43. Massoud A.M., Finney S.J., Williams B.W. Review of harmonic current extraction techniques for an active power filter. Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 12-15 Sept. 2004. Pp. 154–159. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2004.1409345>
44. Asiminoael L., Blaabjerg F., Hansen S. Detection is key - harmonic detection methods for active power filter applications. *IEEE Industry Applications Magazine*. July-Aug. 2007. Vol. 13, No. 4. Pp. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIA.2007.4283506>
45. Machmoum M., Bruyant N. DSP based control of shunt active power filters for global or selective harmonics compensation. Proceedings of the international conference on harmonics and quality of power. 1-4 Oct. 2000. Vol. 2. Pp. 661–666. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2000.897757>
46. Mattavelli P., Marafao F.P. Repetitive-based control for selective harmonic compensation in active power filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Oct. 2004. Vol. 51. No. 5. Pp. 1018–1024. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.834961>
47. Bojoi R., Griva G., Guerriero M., Farina F., Profumo F., Bostan V. Improved current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame. Proceedings of the annual

- power electronics specialists conference. 2004. Vol. 6. Pp. 4623–4629. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1354817>
48. Reis F., Ale J., Adegas F., Tonkoski R. Jr., Slan S., Tan K. Active Shunt Filter for Harmonic Mitigation in Wind Turbine Generators. Proceedings of the 37th IEEE Power Electronics Specialist Conference, Jeju, Korea, 2006. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/pesc.2006.1711743>
49. Kesraoui M., Chaib A., Meziane A., Boulezaz A. Using a DFIG based wind turbine for grid current harmonics filtering. *Energy Conversion and Management*. Feb. 2014. Vol. 78. Pp. 968–975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.090>
50. Mishra A., Tripathi P.M., Chatterjee K. A review of harmonic elimination techniques in grid connected doubly fed induction generator based wind energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. June 2018. Vol. 89. Pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.039>
51. Shapoval I.A., Mykhalskyi V.M., Artemenko M.Yu., Chopyk V.V. and Polishchuk S.Y. Compensation of Current Harmonics by means of Multiple Generation System with Doubly-Fed Induction Generators. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. Pp. 26–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160238>
52. Shapoval I.A., Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V. and Polishchuk S.Y. Selective Compensation of Current Harmonics in Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator based Wind Energy System. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2018. Pp. 214–218. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559569>
53. Shapoval I.A., Mykhalskyi V.M., Artemenko M.Yu., Chopyk V.V. and Polishchuk S.Y. Compensation of Current Harmonics by Means of Grid-Side Converter in Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Energy System. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2019. Pp. 227–232. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764226>

CONTROL STRATEGIES TO ELIMINATE HARMONICS IN POWER GENERATION SYSTEMS BASED ON A DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR

I.A. Shapoval¹, V.M. Mikhalskyi¹, M.Yu. Artemenko², V.V. Chopyk¹, S.Y. Polishchuk¹

¹ – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

² – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: shapoval@ied.org.ua

The variable speed power generation system based on a doubly-fed induction generator is the most popular in the wind industry. The stator is connected directly to the mains in such a generator, while the rotor is connected to the mains via a semiconductor converter. Low electric power quality increases energy and economic losses, leading to operational problems of production. Many publications discuss improving the electric power quality, particularly methods for eliminating harmonics for a power generation system based on a doubly-fed induction generator. Critical evaluation is needed to choose a method of eliminating harmonics for a particular case. The article presents an overview of different control methods for harmonic elimination in power generation systems based on a doubly-fed induction generator. Various strategies are used, which are used both in autonomous systems and in the mode of connection to the network. During the review of control methods for harmonic elimination, their different characteristics were noted, and the advantages and disadvantages of each method were considered. Ref. 53, fig. 6.

Keywords: power generation system, elimination of harmonics, electric power quality, doubly-fed induction generator.

Надійшла: 19.03.2022
Received: 19.03.2022