

© П.С. Циган¹, Ю.В. Шишко¹, Д.А. Чайка¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕХОДУ ГІБРИДНИХ ІНВЕРТОРІВ У АВТОНОМНИЙ РЕЖИМ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

© P. Tsyhan¹, Yu. Shyshko¹, D. Chaika¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

FEATURES OF TRANSITION OF HYBRID INVERTERS TO STANDALONE MODE WITH INDUCTION MOTORS

Мета. Дослідження режимів роботи гібридного інвертора з активно-індуктивним навантаженням та зниженим коефіцієнтом потужності внаслідок пускових режимів асинхронних двигунів у автономному та мережевому режимах.

Методика. Експериментальні методи роботи, використання промислового аналізатора якості електричної енергії та дослідження реальної сонячної станції на основі гібридного інвертора з накопичувачем електричної енергії та фотоелектричними модулями.

Результати. Знайдено особливості характеру перехідного процесу, який відображається у вигляді осцилограм струму та напруги, які мають значні спотворення форми кривої сигналу під час перемикавання, що свідчать про небезпеку експлуатації асинхронних двигунів та гібридних інверторів у процесі зміни режиму, тобто переходу від автономного режиму у мережевий і навпаки, що пов'язано з переходом асинхронного двигуна будь-якого типу у генераторний режим під час вибігу електричної машини. Отриманий результат є наочним доказом того, що системи на основі гібридних інверторів є достатньо стійкими щоб утримати складний перехідний процес з динамічним активно-індуктивним навантаженням, але спотворення форми кривої напруги може викликати хибну роботу іншого захисту та електрообладнання, яке працює на одних шинах з ними.

Наукова новизна. Полягає у визначенні особливостей перехідних процесів у інверторному обладнанні з активно-індуктивним навантаженням та зміною основних параметрів електричної енергії в залежності від співвідношення потужності інвертора та потужності навантаження. Встановлено залежність стійкості інверторного каскаду від значень реактивної потужності у момент пуску асинхронного двигуна з прив'язкою до допустимого значення коефіцієнту потужності інвертора.

Практична значимість. Полягає у обґрунтуванні використання додаткових засобів перетворювальної техніки для експлуатації асинхронних двигунів з можливим резервним живленням від гібридних інверторів та пошуку технічних рішень струмообмеження при переході від режиму споживання від мережі до режиму споживання від інвертора.

Ключові слова: *перехідний процес, гібридний інвертор, асинхронний двигун, вирівнювальний струм, форма сигналу.*

Вступ. У зв'язку з інтенсивним впровадженням джерел децентралізованої генерації та потреби в автономних джерелах живлення необхідним є забезпечення автоматизованих режимів перемикавання між наявними джерелами енергії та їх комбінаціями. З особливостей децентралізованих систем живлення – це обмежена пропускна здатність в рамках одного об'єкту та потреба у комбінації основних джерел живлення з альтернативними, а також аварійних джерел

живлення з альтернативними. Це є основою для побудови гібридизованих систем електропостачання. Системи децентралізованої генерації мають вирішити 2 завдання, першим з яких є – оптимізація споживання електричної енергії, відштовхуючись від економічної доцільності та безперервності електропостачання.

Викладення основного матеріалу і аналіз отриманих результатів. Особливістю переходу від центральної енергетичної системи до режиму автономного енергоострова - є зменшення пропускної здатності, що безпосередньо впливає на відхилення параметрів електричної енергії, зокрема напруги, оскільки кожен електроприймач, так чи інакше, володіє певним значенням пускового струму, а отже створює перехідні процеси встановлення кінцевих параметрів, які можуть призвести до аварійного відключення основного джерела живлення. Звідси маємо, що необхідно ввести нові критерії динамічної та статичної стійкості для гібридних інверторів та встановити відповідні залежності та критерії стійкості. Для систем, де в якості основного джерела живлення є дизельні, газотурбінні, бензинові генератори на основі синхронних машин можна користуватись класичними методами оцінки перехідних процесів електромеханічного характеру. Одним з факторів які створюють несприятливі електромагнітну обстановку, окрім пускових навантажень, є не симетрія та не синусоїдальність місцевих струмоприймачів. Зважаючи на кількість та характер сучасної побутової та промислової техніки, її характер в основному можна назвати імпульсним, що має невибагливі вимоги до технічної експлуатації з погляду рівня напруги та частоти, мається на увазі, універсальні блоки живлення на стандарти частот 50–60 Герц. Побудова гібридних систем на основі гібридних інверторів вимагає наявності накопичувачів електричної енергії, у більшості випадків це літій-іонні акумулятори та літій-ферум-фосфатні акумулятори з вбудованою BMS. Системи з BMS дозволяють збільшити строк експлуатації акумуляторів та виконувати постійний контроль стану заряду кожної комірки. Саме контроль кожної комірки через системи BMS дозволить оцінити практичну місткість системи накопичення електричної енергії та приблизну динамічну стійкість системи накопичення електричної енергії, де в якості об'єктивної оцінки запасу динамічної стійкості можна визначити максимально допустиму межу накиду навантаження без відхилень напруги мережі, за умови використання автономної частини інвертора в якості основного джерела, що задає всій системі напругу та частоту змінного струму. З метою динамічного балансування в рамках енергетичного острова або мікрогрід системи можна використовувати мережеві інвертори, які спираються на вихідний каскад гібридного інвертора. Враховуючи специфіку переходу гібридних інверторів від роботи з електричної мережі до автономного режиму необхідно обирати гібридні інвертори з мінімальним часом переходу для забезпечення швидкого резервного живлення. Одним з параметрів який є важливим для переходу у автономний режим є швидкість відновлення живлення струмоприймачів [1]. В рамках створення мікрогрід систем важливо забезпечити безперебійним електропостачанням не тільки струмоприймачі, а й кола автоматики, контролю і елементів захисту. Аналізуючи існуючі моделі гібридних інверторів можна вивести ряд пристроїв які складаються у концепції безперебійного електропостачання, наприклад,

гібридний інвертор Deye SUN-15K-SG01HP3-EU-AM2 (рис. 1), з часом перемикання 0,04 сек, що відповідає двом періодам змінного струму, тобто, забезпечує безперервність електропостачання для більшості побутових навантажень та навантажень промислового характеру на час достатній для утримання в робочому режимі більшості електронно-обчислювальної техніки та електромеханічних пристроїв.

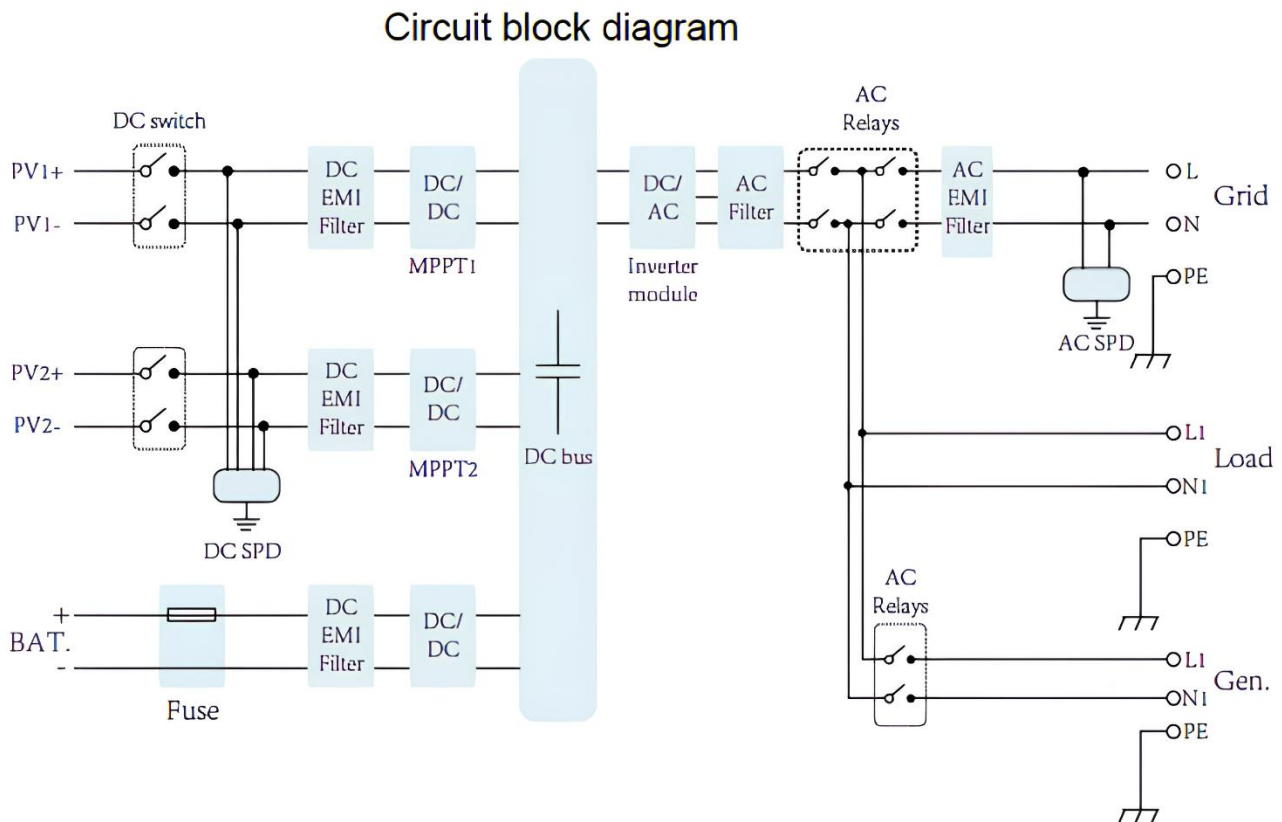


Рис. 1 Блок-діаграма гібридного інвертора Deye

Швидкість перемикання зумовлена фізичною здатністю контактних систем перевести навантаження за мінімально можливий час, то ж маємо фізичне обмеження пов'язане з швидкістю комутації фізичних контактів, де має змінитись у випадку однофазного інвертора мінімум дві групи контактів місцями за час перемикання [2]. Враховуючи, що за час пуску має автономна складова інверторного каскаду змінити режим від мережевого до автономного, тобто, модуль інвертора переходить з режиму інвертора струму у режим інвертора напруги, зміна режиму інверторного каскаду є умовною, оскільки, для системи керування відбувається перехід від мережевої роботи, що означає опирання системи керування на напругу мережі до створення повністю автономного сигналу внутрішнім тактовим генератором для приєднання навантаження, саме такі процеси відбуваються за час 0,04 сек. Тобто, вмикання інвертора у автономний режим буде супроводжуватись не значними перехідними процесами (рис. 2) і чим менший час переходу, тим менші значення основних параметрів перехідних процесів, таких як, зміна напруги та струму у момент перемикання.

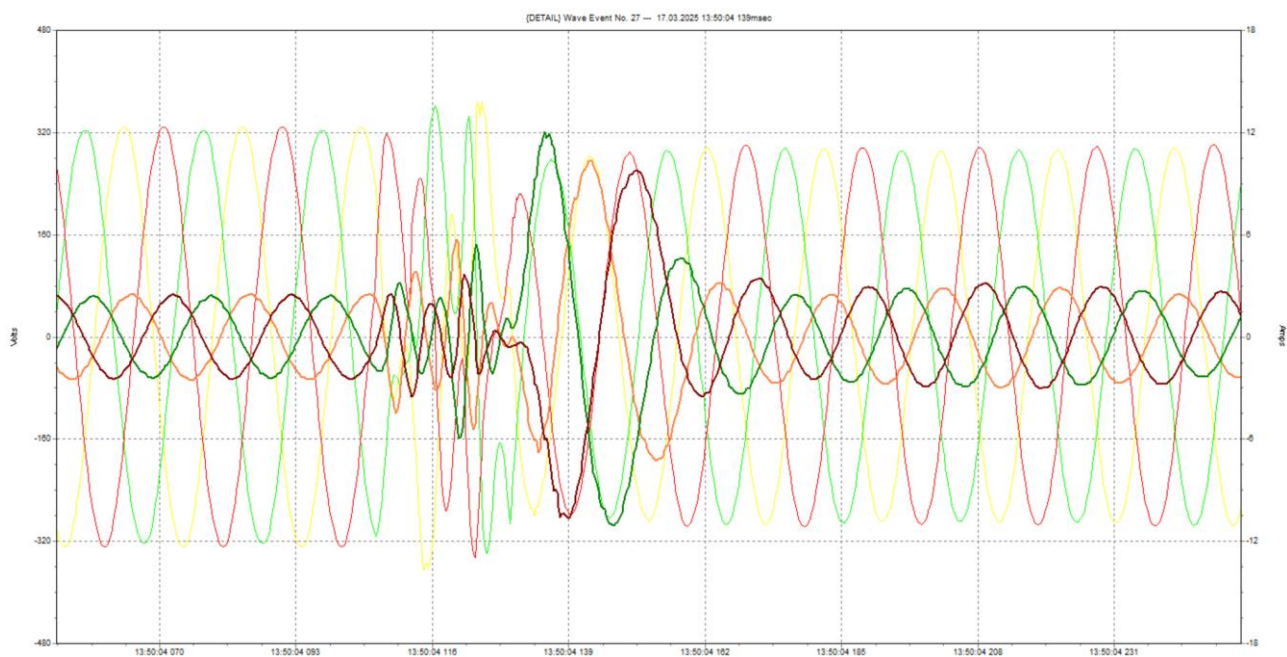


Рис. 2. Перехідний процес перемикання гібридного інвертора з мережі у автономний режим

Перехідний процес супроводжується спотворенням кривої форми напруги та струму у процесі перемикання та може створити умови до появи процесів опрокидування мережевих інверторів по типу Microgrid-інверторів які спираються на напругу гібридного інвертора у автономному режимі [3]. Дослід з діаграми (див. рис. 2) показує зміну спектрального складу струму та напруги у процесі перемикання, їх середньоквадратичних значень та частоти. Дослід проводився на базі 20 кВт інвертора SUN-20K-SG05LP3-EU-SM2 з навантаженням активно-індуктивного характеру у вигляді спареної машини асинхронного двигуна, який приєднувався до виходу навантаження гібридного інвертора та для зміни завантаження (коефіцієнту потужності) двигуна використовувалася машина постійного струму у генераторному режимі. Проводилися дослід пуску асинхронного двигуна при роботі від електричної мережі мережевого інвертора та імітувався перехід з роботи від мережі у автономний режим, у даному режимі і спостерігалися процеси приведені у рис. 2. Характерною складовою дослід є те, що двигун приєднувався до гібридного інвертора через схему з самопідхватом на основі контактора, що у разі зникнення живлення протягом тривалого часу мало призвести до розмикання силових кіл даного контактора, але оскільки час перемикання був меншим 0,04 секунди, що відповідає паспортним характеристикам кола самопідхвату залишились у замкненому стані і двигун продовжив роботу. Але незважаючи на високу швидкість перемикання протягом часу 0,025 секунди спостерігався перехідний процес з радикальними змінами форм кривих напруги, струму, частоти та спектрального складу цих сигналів, що може мати певні наслідки у вигляді резонансних явищ з активно-індуктивним та ємнісним навантаженням (рис. 3).

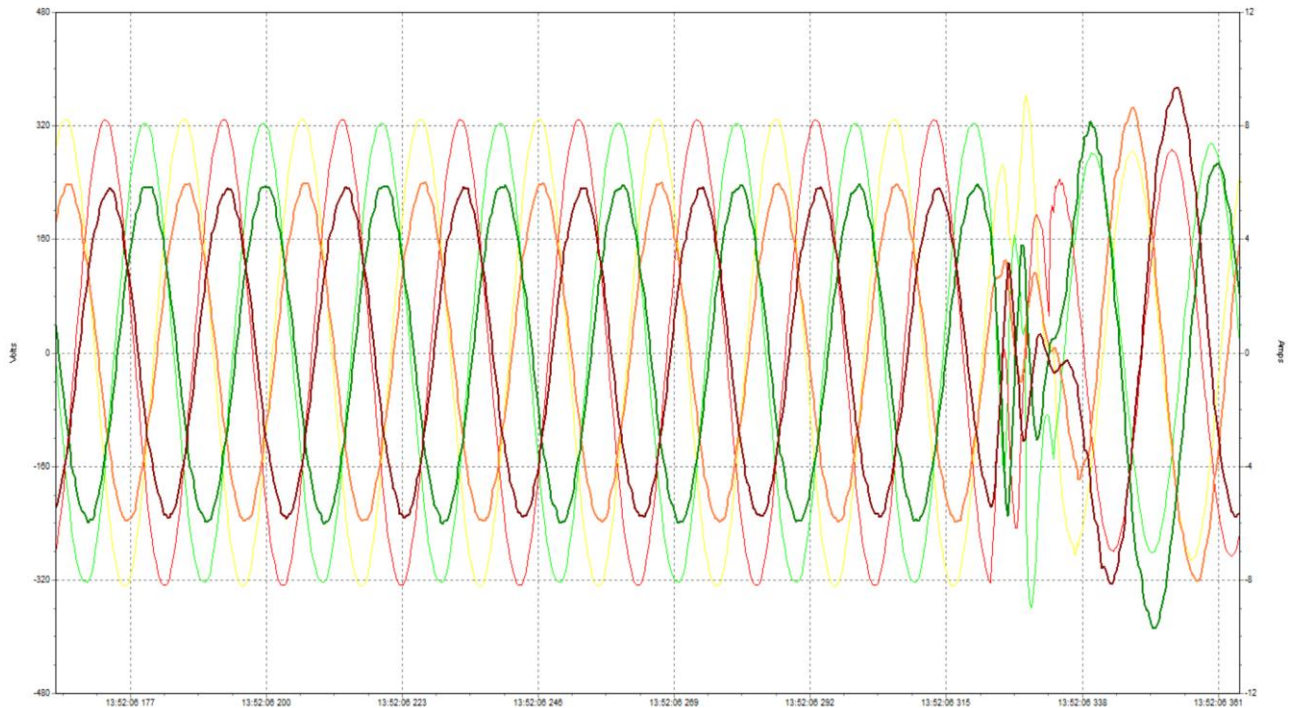


Рис. 3. Перехідний процес переходу від автономного режиму мережевого інвертора до роботи від електричної мережі

При поверненні до електричної мережі гібридним інвертором без вимикання навантаження спостерігався майже аналогічний перехідний процес, як і при виході у автономний режим, таким чином стає зрозумілою природа процесу, яка може бути пов'язана з двома основними факторами [3]. Перший з них – це розбіжність частоти електричної мережі та частоти автономного каскаду гібридного інвертора, що у процесі перемикання вмикає мережу з відмінним від інверторного каскаду по частоті та фазовому куту джерела напруги на діюче навантаження. Другий фактор – це характер навантаження, який може мати широкий діапазон реактансів як індуктивного так і ємнісного характеру, до цього ж фактору також належить діапазон зміни відношення реактивних опорів до активних складових опорів і диференціація їх величин у часі (швидкість протікання перехідних процесів, яка залежить від факторів не електричного характеру) до прикладу зміна навантаження на валу електродвигуна або зміна реактивної потужності частотно-залежних електричних навантажень (конденсаторні установки, безтрансформаторні імпульсні блоки живлення, тощо).

Окремо розглядаючи перехідний процес за однією фазою (А) можна помітити кидок струму після закінчення переходу від однієї системи живлення до іншої. Так як у дослідженні використовувався асинхронний двигун, у момент переходу асинхронна машина короткочасно знаходилась у режимі генерації, який був заданий раніше трифазною ЕРС мережевого інвертора і у момент перемикавання, ЕРС асинхронної машини у режимі генератора та ЕРС електричної мережі не співпадали по фазам, відповідно з'явився короткочасний кидок вирівнювального струму. Так як асинхронна машина не співставна з потужністю інвертора,

захист від перевантаження та короткого замикання не спрацював, оскільки кидок струму знаходився в межах номінального робочого струму інвертора. Спираючись на дані масштабованої осцилограми легко помітити, що значення величини вирівнювального струму та номінального струму відрізняються у майже 2,5 рази, враховуючи, що за такий короткий період асинхронна машина не втратила швидкість та момент, то вирівнювальний струм мав характер аперіодичного затухаючого і був пов'язаний з процесами ресинхронізації векторів ЕРС електричної мережі та асинхронного двигуна, що обертається. З цього можна зробити висновок, що співставна за потужністю мережевого інвертора електрична машина матиме значення вирівнювального струму у 2,5 рази більше від номіналу і незважаючи на швидкість перемикання є ймовірність появи аварійного режиму, у зв'язку з можливою роботою високошвидкісного захисту інвертора. Таким чином, гібридні інвертори можна використовувати для резервування активно-індуктивних навантажень, таких як асинхронні двигуни, але з використанням частотних перетворювачів, які б забезпечили зниження рівня залежності процесів переходу від режиму з мережевого у автономний і навпаки, та повністю прибрали фактор можливих зустрічних ЕРС, які виникають у наслідок переходу електричних машин у генераторний режим за рахунок їх вибігу та несинхронного повторного вмикання упродовж перехідного процесу (рис. 4).

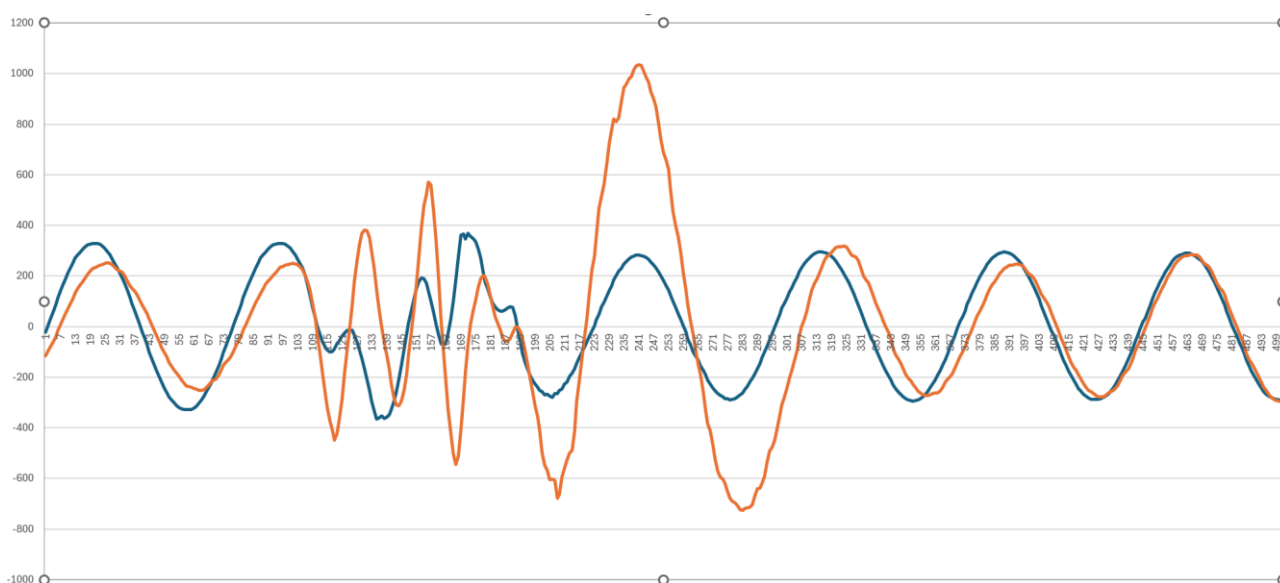


Рис. 4. Масштабовані дані перехідного процесу по фазі А (струм у амперах масштабований у 100 разів для співставлення з осцилограмою напруги)

З метою забезпечення статичної стійкості нема потреби у прогнозуванні електричних навантажень, якщо система з самого початку обиралась під місцеве навантаження, у разі необхідності динамічного балансування можна використовувати методи компенсації реактивної потужності на основі статичних конденсаторних батарей або інверторів з можливістю активної компенсації за реактивною потужністю ємнісного характеру, де його експлуатація буде зумовлена підтримкою рівня напруги на секціях шин РП [3]. Наявність динамічної компенсації

реактивної потужності зумовлена нестійкою роботою інверторного обладнання у пускових режимах навантаження в окремих випадках, це пуски асинхронних електродвигунів або великих груп освітлювальних пристроїв, що характерно для асинхронних двигунів, це пускові режими з початковими кидками струму намагнічування, що можуть перевищувати номінальні робочі струми у 5–7 разів, але сучасним розв'язанням цієї проблеми є використання частотних перетворювачів для регулювання режиму роботи та зниження пускових струмів до рівня номінальних. Стосовно приладів освітлення та їх одночасного вмикання виникає проблема у початковий момент комутації, оскільки більшість освітлювальних приладів світлодіодного типу обладнані імпульсними блоками живлення і перехідний процес до встановлення кінцевого значення номінального струму часто супроводжується значним струмом ємнісного характеру, на противагу цьому немає технічних засобів для адекватної протидії кидку імпульсного струму освітлювального навантаження, окрім розгрупування освітлення та його каскадного вмикання з використанням таймерів або логічних реле, за умови симетричності розподіленого освітлювального навантаження по фазах електричної мережі.

Тобто, для реалізації успішної концепції автономного енергетичного острова необхідно більшою мірою вживати заходів зі струмообмеження, виконувати постійну оцінку динамічної стійкості системи шляхом аналізу місткості акумулятора за допомогою BMS та використовувати засоби компенсації реактивної потужності, які здатні працювати як для покриття загального масиву споживаної реактивної потужності, так і для покриття динамічного режиму реактивних навантажень шляхом використання інверторних пристроїв компенсації реактивної потужності. Завдання будь-якої енергетичної системи підтримка основних параметрів розподільної мережі в рамках номінальних значень напруги та частоти з врахуванням стандартів по типу EN50160 та забезпечення резерву потужності для можливих збурень у вигляді накиду навантаження або короткочасного аварійного режиму, що створює нові вимоги до пристроїв релейного захисту та автоматики ізольованих систем. Релейний захист та автоматика вимагатимуть більшої швидкості спрацювання оскільки час опрокидування перетворювача інверторного типу може складати долі секунд і стандартні захисні характеристики комутаційних апаратів не задовольнятимуть місцевим вимогам до необхідної швидкості вмикання та визначення аварійного режиму. Тож необхідно визначити межі стійкої роботи гібридного інвертора у автономному режимі роботи, будь які види захисту необхідно відштовхувати від типу навантаження, враховуючи його характер, маючи на увазі попередження аварійних ситуацій шляхом впровадження струмообмежуючих заходів та попереднього розрахунку можливих режимів роботи обладнання. Межа стійкої роботи перетворювача має враховувати параметри максимально можливих меж пропускну здатності перетворювального обладнання, відштовхуючись від його паспортних характеристик. Наприклад, номінальна потужність та коефіцієнт потужності. Вказане значення номінальної потужності слід сприймати як повну потужність виражену не у kW, а у kVA, оскільки параметр коефіцієнту потужності дає можливість визначити максимальне значення реактивної потужності, яке може видати інверторний каскад гібридного

інвертора. Це значення необхідне для аналізу максимально можливих пускових режимів для активно-індуктивного навантаження, яке може бути приєднане у пусковому режимі без опрокидування інверторного каскаду.

$$P_{\cos \varphi \text{ nom}} = S_{\text{nom inv}} \cdot \cos \varphi \text{ nom},$$

де $S_{\text{nom inv}}$ – номінальна потужність інвертора; $\cos \varphi \text{ nom}$ – номінальний діапазон коефіцієнту потужності; $P_{\cos \varphi \text{ nom}}$ – складова активної потужності при номінальному коефіцієнту потужності.

Необхідним для аналізу можливого накиду значного індуктивного навантаження є визначення діапазону запасу активної складової потужності $P_{\cos \varphi \text{ nom}}$, необхідність пов'язана з аналізом можливого режиму накиду навантаження на інверторний каскад та технічною реалізацією розвантаження перетворювального каскаду з метою збереження режиму роботи гібридного інвертора в автономному режимі. Тож визначення залишкової активної потужності та прив'язка до коефіцієнту потужності навантаження може використовуватись як динамічна уставка високошвидкісного захисту з метою захисту від опрокидування інверторного каскаду, оскільки, при прямому приєднанні асинхронних двигунів у якості навантажень виникає пусковий режим пов'язаний з розгортанням електричної машини, який супроводжується накидом реактивної потужності та кидком струму намагнічування. Якщо оцінити приблизний діапазон допустимих потужностей асинхронних двигунів можна використати приблизну оцінку потужності двигуна для реально існуючого інвертора.

З метою виконання приблизної оцінки необхідно задатись початковими припущеннями для аналізу можливих потужностей асинхронних двигунів, які можуть запускатись прямим пуском від інверторного каскаду гібридного інвертора, відштовхуючись від значення максимально можливої реактивної потужності двигуна у момент пуску. Припущення: розглянемо дві електричні машини з кратністю пуску $K = 5$ та $K = 7$. Клас напруги 0,4 кВ та $\cos \varphi_{\text{ад ном.}} = 0,85$. Першопочатково користуючись номінальною потужністю інвертора (20 kW) та коефіцієнтом потужності (0,8) визначаємо його активну складову:

$$P_{\cos \varphi \text{ nom}} = S_{\text{nom inv}} \cdot \cos \varphi \text{ nom} = 20 \text{ kW} \cdot 0,8 = 16 \text{ kW},$$

де $S_{\text{nom inv}}$ – паспортна повна потужність інвертора; $\cos \varphi \text{ nom}$ – паспортний коефіцієнт потужності інвертора.

Визначаємо максимальну реактивну складову потужності яку можливо отримати від інверторного каскаду:

$$Q_{\cos \varphi \text{ nom}} = \sqrt{S_{\text{nom inv}}^2 - P_{\text{nom inv}}^2} = \sqrt{20 \text{ kW}^2 - 16 \text{ kW}^2} = 12 \text{ kvar}.$$

Визначаємо значення реактивного струму:

$$I_{\text{var } \cos \varphi} = \frac{Q_{\cos \varphi \text{ nom}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nom}}} = \frac{12 \text{ kvar}}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \text{ kV}} = 17,3 \text{ A}.$$

Враховуючи, що асинхронні двигуни у момент пуску споживають в основному суто реактивну потужність необхідним є – визначити максимальну реактивну потужність, яку здатен видати інвертор використовуючи паспортний коефіцієнт потужності. У подальшому визначивши максимальну реактивну потужність застосовуючи діапазон кратностей пускових струмів від 5 до 7, знаходимо номінальні струми двигунів. Використання даної методології дослідження дозволяє нам прийняти припущення, що схема заміщення асинхронного двигуна у момент пуску складається з індуктивного елементу, а надперехідний опір ротора дорівнює 0, нехтуючи активним опором обмоток та опором активного характеру ротора. Активні опори елементів асинхронного двигуна у момент пуску є неспівставними з опором індуктивного характеру обмоток статера.

Враховуючи, що у досліді розглядаються машини з діапазоном кратностей пускових струмів від 5 до 7, виконаємо два розрахунки для визначення номінальних струмів двох типів асинхронних двигунів:

$$I_{nom\ AM(K=5)} = \frac{I_{var\ Cos\ \varphi}}{Kst_5} = \frac{17,3\ A}{5} = 3,46\ A;$$

$$I_{nom\ AM(K=7)} = \frac{I_{var\ Cos\ \varphi}}{Kst_7} = \frac{17,3\ A}{7} = 2,47\ A,$$

де Kst_5 і Kst_7 є кратностями пуску асинхронних двигунів.

Визначивши номінальні струми асинхронних двигунів виходячи з параметрів максимального реактивного струму інвертора та можливих кратностей пуску асинхронних двигунів необхідно використати задані припущення з метою визначення допустимої потужності асинхронних двигунів, які можуть вмикатись прямим пуском від каскаду гібридного інвертора без порушення стійкості його роботи.

Необхідно з припущень виконати розрахунок потужностей асинхронних двигунів:

$$P_{AM5} = \sqrt{3} \cdot U_{nom} \cdot I_{nom\ AM(K=5)} \cdot \cos\varphi_{nom\ AM} = \sqrt{3} \cdot 0,4\ kV \cdot 3,46\ A \cdot 0,85 = 2,03\ kW$$

$$P_{AM7} = \sqrt{3} \cdot U_{nom} \cdot I_{nom\ AM(K=7)} \cdot \cos\varphi_{nom\ AM} = \sqrt{3} \cdot 0,4\ kV \cdot 2,47\ A \cdot 0,85 = 1,45\ kW$$

Розрахунковий діапазон, який в основному залежить від кратності пуску двигуна показує, що за потужності інверторного перетворювача у $S_{nom\ inv} = 20\ kW$ при $\cos\varphi_{nom} = 0,8$ дозволяє експлуатувати навантаження у вигляді двигунів лише на певним запасом потужності, яку можна визначити відношенням повної потужності інвертора до повної потужності асинхронного двигуна:

$$N_{\Delta\ AM5} = \frac{P_{\cos\varphi_{nom}} + jQ_{\cos\varphi_{nom}}}{P_{P_{AM5}} + jQ_{\cos\varphi_{nom\ AM}}} = \frac{16 + j12}{2,03 + j0,85} = 9,08,$$

$$N_{\Delta\ AM7} = \frac{P_{\cos\varphi_{nom}} + jQ_{\cos\varphi_{nom}}}{P_{P_{AM7}} + jQ_{\cos\varphi_{nom\ AM}}} = \frac{16 + j12}{1,45 + j0,9} = 11,72,$$

де $N_{\Delta\ AM5}$ і $N_{\Delta\ AM7}$ не використаний запас потужності інвертора після виходу асинхронного двигуна у номінальний робочий режим [4–6].

Висновки. Потужність гібридних інверторів, яка зазначається у кВт та номінальний коефіцієнт потужності дозволяє охарактеризувати величину максимально реактивного значення потужності, яку можна отримати з інверторного каскаду обмеженого межею стійкості системи керування інвертора та величиною первинного джерела енергії будь-то акумулятор або фотоелектричні модулі. Використання гібридних інверторів в якості джерел автономного живлення насосних станцій або інших електричних навантажень з високими пусковими струмами є технічно неможливим без впровадження ефективних засобів обмеження пускових струмів таких як, використання частотних перетворювачів та, в окремих випадках, компенсації реактивної потужності. Використання пристроїв плавного пуску на основі симісторів може призвести до спотворення форми кривої напруги та вивести інвертор у аварійний режим за рахунок нелінійного навантаження та низького коефіцієнта потужності, навіть в межах номінального струму за середньоквадратичним значенням.

Перелік посилань

1. Milenov, V., Zarkov, Z., & Romero, L. T. (2023). Application of hybrid inverters in photovoltaic systems. In *Proceedings of the 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. <https://doi.org/10.1109/ELMA58392.2023.10202452>
2. Gevorkov, L., Domínguez-García, J. L., Romero, L. T., & Martínez, À. F. (2023). Modern multi-port converter technologies: A systematic review. *Applied Sciences*, 13(4), 2579. <https://doi.org/10.3390/app13042579>
3. Guo, Y., Geng, H., & Pal, B. C. (2021). Global optimality of inverter dynamic voltage support. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(5), 3690–3701. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3064239>
4. Tanev, T., & Stanev, R. (2019). Mathematical model of photovoltaic inverters. In *2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BulEF48056.2019.9030901>
5. Arnaudov, D., Hinov, N., Vuchev, S., & Nedyalkov, I. (2017). Modeling of multiphase converter for charging of energy storage elements. In *PCIM Europe 2017; IECPE – Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (pp. 1–7).
6. Le, N. T., & Benjapolakul, W. (2019). Evaluation of contribution of PV array and inverter configurations to rooftop PV system energy yield using machine learning techniques. *Energies*, 12(24), 3158. <https://doi.org/10.3390/en12243158>

ABSTRACT

Purpose. To study the operating modes of a hybrid inverter with an active-inductive load and a reduced power factor due to the starting modes of induction motors in both standalone and grid-connected modes.

Methodology. Experimental methods were applied, including the use of an industrial power quality analyzer and investigation of a real solar power plant based on a hybrid inverter with an energy storage system and photovoltaic modules.

Results. The study revealed specific features of the transient process, represented as current and voltage oscillograms with significant waveform distortions during switching. These distortions indicate the potential hazards of operating asynchronous motors and hybrid inverters during mode transitions, i.e., switching from autonomous to grid-connected mode and vice versa. This is associated with the asynchronous motor entering a generator mode during machine run-down. The obtained results clearly demonstrate that systems based on hybrid inverters are sufficiently stable to withstand

complex transient processes under dynamic active-inductive loads. However, voltage waveform distortions can trigger malfunctions in other protective devices and electrical equipment operating on the same bus.

Scientific novelty. The novelty lies in identifying the features of transient processes in inverter equipment with active-inductive loads and the variation of key electrical parameters depending on the ratio between inverter power and load power. The study establishes the dependence of the inverter cascade stability on the reactive power levels at the moment of asynchronous motor start-up, with reference to the permissible inverter power factor values during the transition from grid-supplied to inverter-supplied operation.

Practical significance. In justifying the use of additional power conversion equipment for operating induction motors with potential backup power from hybrid inverters, as well as in searching for technical solutions for current limiting during transitions from grid-supplied operation to inverter-supplied operation.

Keywords: *transient process, hybrid inverter, induction motor, balancing current, waveform distortion.*