

ВПЛИВ ІНВЕРТОРНИХ ДЖЕРЕЛ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ГАРМОНІЧНИЙ СКЛАД НАПРУГИ В МЕРЕЖІ

Гулий В. С., асистент, Татусь Р. М., магістрант, Яндутьський О. С., д.т.н., професор

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. В умовах зростання долі розподіленої генерації в електричних мережах середньої напруги 10 кВ, інверторні джерела є домінуючим типом підключення розподіленої генерації потужністю до 1 МВт. На відміну від синхронних або асинхронних генераторів, інвертори формують вихідну напругу на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), яка апріорі містить гармонічні складові вищих порядків. Тому питання формування спектра напруги та струму інверторами, а також його впливу на режими мереж 10 кВ, є фундаментальним для оцінки якості електроенергії.

Мета роботи. Окреслити вплив інверторних джерел розподіленої генерації на гармонічний склад напруги мережі та продемонструвати ефективні способи нівелювання гармонік.

Матеріали та результати досліджень. Інвертори малої генерації, як правило, підключаються до мережі 10 кВ через узгоджувальний трансформатор типу «інвертор – SN», найчастіше з групою з'єднання Dyn11 або Ynd11. Напруга формується за допомогою імпульсного мостового перетворювача, в якому напруги ключів комутуються з високою частотою (від 4 до 20 кГц залежно від класу обладнання) відповідно до обраного закону модуляції [3].

У випадку приєднання інвертора до мережі з ізольованою нейтраллю важливо, що гармоніки кратні 3 (3, 9, 15) не замкнуті через нейтраль і не циркулюють у фазних провідниках, проте можуть існувати у магнітному режимі трансформатора, викликаючи додаткові втрати у сталі [4].

Для інверторів характерна наявність гармонік порядків:

$$N = 6k \pm 1, \quad k=1,2,3\dots \quad (1)$$

що дає найзначніші складові 5-ї, 7-ї, 11-ї та 13-ї гармонік у мережі 10 кВ. Амплітуди гармонік спадають приблизно пропорційно $1/n$, однак їхній вплив не є незначним, оскільки мережі середньої напруги мають меншу величину активного демпфування, ніж низьковольтні мережі [2].

Для оцінки загального рівня гармонічних спотворень застосовується показник сумарне гармонійне спотворення (THD):

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^n \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \quad (2)$$

де U_1 – амплітуда основної гармоніки, U_n – амплітуда n-ї гармоніки.

Типові вимірні значення THD напруги в точці приєднання інверторної генерації потужністю 0,5–1 МВт становлять 2–4%, що зазвичай знаходиться в межах норм EN 50160 для мереж 10 кВ ($THD \leq 8\%$) [1].

Група з'єднання трансформатора впливає на значення окремих гармонік:

Таблиця 1 – Вплив групи з'єднання трансформатора на гармоніки мережі

Група з'єднання трансформатора	Забезпечення блокування гармонік	Примітка
DYN11/DYN5	5-та, 7-ма частково	Локалізація гармонічних струмів у внутрішньому контурі НН-обмотки (трикутник)
YND11	3-тя гармоніка у магнітному колі	Не проходить у мережу, але збільшує втрати у сталі
YY0	Гармоніки передаються без пригнічення	Небажана для мереж розподіленої генерації

Підсумовуючи дані про вплив групи з'єднання трансформатора з таблиці 1, варто сказати, що правильний вибір трансформатора зі з'єднанням обмоток на стороні низької напруги за схемою трикутника є одним із базових пасивних засобів зниження впливу гармонік [3, 4].

У мережах 10 кВ із ізольованою нейтраллю гармоніки не викликають зростання струму нейтралі, як у мережах 0,4 кВ. Проте відбувається зміщення векторної діаграми фазних напруг, що ускладнює роботу релейного захисту, зокрема фазочутливих і напрямних захистів. Високочастотні складові підвищують втрати на вихрові струми в трансформаторах та кабелях [5].

Інверторні генеруючі установки потужністю до 1 МВт, що приєднуються до розподільчих мереж класу напруги 10 кВ, як правило, реалізовані на базі широтно-імпульсних перетворювачів (ШІМ), побудованих на IGBT-транзисторах або SiC ключах [2]. Принцип формування напруги інвертора полягає у високочастотному комутаційному керуванні, що приводить до наявності у вихідному сигналі вищих гармонічних складових із частотами, кратними основній, а також у комутаційних діапазонах [3].

У розподільчих мережах з ізольованою нейтраллю вплив цих гармонічних компонент має ряд особливостей. Відповідно до ДСТУ EN 50160:2014 та IEC 61000-2-4, напруга у мережі 6–20 кВ повинна характеризуватися коефіцієнтом загальних спотворень $THD \leq 8\%$ та обмеженнями для окремих гармонік [1].

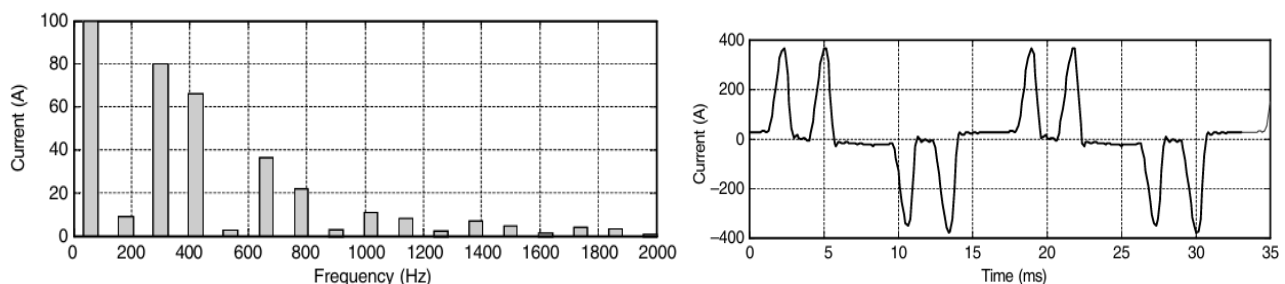


Рисунок 1 – Гармонічний склад напруги в мережах 10 кВ [6]

Продемонстровані на рисунку 1 гармоніки 3, 9, 15 та ін. належать до нульової послідовності (однакова фазова полярність у всіх фазах). У мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю відсутній шлях для їх циркуляції «в сторону землі». Однак вони формуються на стороні низької напруги інвертора, якщо алгоритм ШІМ створює фазові спектральні компоненти нульової послідовності [4]. У більшості схем приєднання малої генерації використовується трансформатор трикутник/зірка (трикутник на НН, зірка на ВН). Обмотка трикутник забезпечує замикання гармонік нульової послідовності всередині трикутника, формуючи циркулюючі струми, які не передаються до мережі 10 кВ [3].

Тому з'єднання трикутник/зірка є ефективним конструктивним методом обмеження впливу 3-ї, 9-ї, 15-ї гармонік на мережу з ізольованою нейтраллю. Це є одним з ключових аргументів на користь використання трансформатора з обмоткою за схемою трикутник на стороні інвертора при інтеграції малої генерації в мережі середньої напруги.

Основними гармонічними складовими, що передаються у мережу без суттєвого подавлення, є:

5-та (250 Гц) – гармоніка негативної послідовності,

7-ма (350 Гц) – гармоніка позитивної послідовності,

11-та та 13-та – гармоніки вищих порядків, характерні для багаторівневих та синус-модульованих інверторів. Варто зауважити, що струм гармоніки також залежить від рівня та характеру навантаження. У мережах 10 кВ, де індуктивна складова імпедансу переважає, можливе паралельне резонансне підсилення 5-ї гармоніки між індуктивністю лінії та ємністю вихідних LC-фільтрів або довгих кабельних вставок [4]. Це явище здатне призводити до: підвищення THD напруги, зростання теплових втрат у двигунах, похибок вимірювання трансформаторами струму та напруги, некоректної роботи захисту [6, 7].

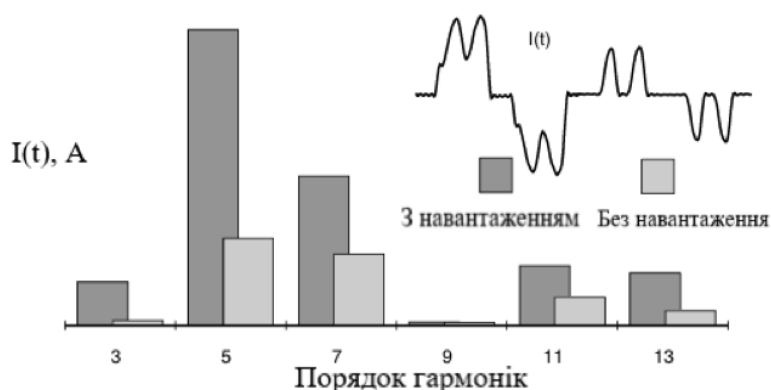


Рисунок 2 – Характер гармонік в мережах із трифазними інверторами [6]

У мережах з ізольованою нейтраллю значення має навіть невелике зміщення нейтралі, яке може бути посилене при наявності вищих гармонік. Гармонічні складові негативної послідовності можуть викликати:

хвибне спрацьовування захисту за напрямком потужності замикання на землю, ненадійну роботу дугогасних реакторів [8]. Аналізуючи в тому числі рисунок 2, можна сказати, що присутність інверторної малої генерації в мережах 10 кВ з ізольованою нейтраллю вимагає аналізу режимів гармонічної взаємодії.

Гармонічні складові, що формуються інверторними джерелами малої генерації, можуть суттєво впливати на якість електроенергії у мережах 10 кВ. Для забезпечення норм EN 50160 та ДСТУ EN 50160:2014 застосовують різні методи компенсації гармонік, зокрема пасивні та активні фільтри [1].

Пасивні фільтри (LC-фільтри) проектуються для подавлення окремих гармонік — зазвичай 5-ї, 7-ї та 11-ї, що є найпоширенішими у мережах з ШІМ-інверторами, [6]. Вони встановлюються на стороні низької напруги інвертора або безпосередньо на ВН-шині трансформатора. Основні переваги: простота конструкції та налаштування; висока надійність без необхідності активного керування. Недоліки: можливість резонансного підсилення гармонік у суміжних частотних діапазонах; потреба у великих індуктивностях для низьких частот [7].

Активні фільтри використовують силові перетворювачі для компенсації гармонік у реальному часі. Вони підключаються паралельно до мережі і генерують струм, протилежний гармонікам, що виникають від інверторів [7]. Серед їх переваг – можливість гнучкого налаштування під різні гармонічні спектри; зменшення ТНД напруги до рівнів $\leq 3\%$ у вузлах приєднання; ефективні для компенсації гармонік нульової та позитивної послідовності [8].

Висновок. Інверторні джерела розподіленої генерації потужністю до 1 МВт формують напругу з гармоніками вищих порядків, зокрема 3-ї, 5-ї, 7-ї, 9-ї, 11-ї та 13-ї. Гармоніки нульової послідовності локалізуються у трансформаторі зі схемою трикутник/зірка, запобігаючи їх переносу у мережу та додатковим втратам. Гармоніки позитивної та негативної послідовності можуть підвищувати ТНД, викликати втрати у обладнанні та впливати на роботу релейного захисту. Для зниження цих впливів ефективно застосовувати пасивні LC-фільтри та активні фільтри, що дозволяють утримувати ТНД у межах нормативів і забезпечують стабільну роботу мережі. Комплексний підхід із правильним вибором трансформаторів та фільтрів дозволяє інтегрувати розподілену генерацію без погіршення якості електроенергії.

Перелік використаних посилань

1. ДСТУ EN 50160:2014. Електрична енергія у розподільчих мережах – Характеристики напруги. – Київ: Держспоживстандарт України, 2014. – 34 с.
2. Akagi, H., Watanabe, E.H., Aredes, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. 2-е вид., Wiley-IEEE Press, 2007. – 384 с.
3. IEEE Std 519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. – IEEE, 2014. – 42 с.
4. Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley-IEEE Press, 2006. – 258 с.
5. Arrillaga, J., Watson, N.R., Chen, S. *Power System Quality Assessment*. Wiley, 2000. – 376 с.
6. Dugan, R.C., McGranahan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W. *Electrical Power System Quality*. 2-е вид., McGraw-Hill, 2004. – 521 с.
7. CIGRÉ Technical Brochure 627. *Integration of Distributed Generation in Medium Voltage Networks*. Paris: CIGRÉ, 2015. – 78 с.
8. Zobaа, A.F. *Harmonic mitigation techniques applied to modern distribution systems*. Electric Power Components and Systems, 2010. Vol. 38, No. 8, pp. 896–909.