

УДК 621.311.24:621.311.001.57

М. С. Сегеда, д. т. н., проф.; О. Б. Дудурич**МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ЧАСТОТИ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ВІТРОВИМИ
ЕЛЕКТРИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ ЗМІННОЇ ШВИДКОСТІ
ОБЕРТАННЯ З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ З ПОДВІЙНИМ
ЖИВЛЕННЯМ**

Розглянуто вплив вітроелектричних установок змінної швидкості обертання з асинхронними генераторами з подвійним живленням на регулювання частоти в електроенергетичних системах. У програмному комплексі Power Factory DIg SILENT GmbH розроблено модель дослідження та наведено результати моделювання зміни частоти за зміни різної частки навантаження. Рекомендовано цю узагальнену модель використовувати для визначення зміни частоти в електроенергетичних системах з вітроелектричними установками змінної швидкості обертання з асинхронними генераторами з подвійним живленням.

Ключові слова: асинхронний генератор із подвійним живленням, відновлювані джерела енергії, вітрова електрична станція, вітроелектрична установка змінної швидкості обертання, електроенергетична система, електрична мережа, коротке замикання, силова електроніка, синхронний генератор, частота.

Вступ

Зі збільшенням виробітку електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) із енергії вітру, зростає необхідність дослідження впливу вітроелектричних установок (ВЕУ) на електроенергетичні системи (ЕЕС). У сучасних ВЕУ використовують різні типи генераторів. На сьогодні для роботи у складі ЕЕС найбільш широкого використання набули вітроелектричні установки змінної швидкості обертання (ВЕУ ЗШО) із асинхронними генераторами з подвійним живленням (АГПЖ) потужністю 2 МВт і вище. Однією з переваг цього типу генераторів є можливість контролю активної і реактивної потужностей. Одним із недоліків ВЕУ ЗШО, зокрема з АГПЖ, є неможливість регулювання частоти ЕЕС [2, 3, 5].

Частота є важливим параметром кожної ЕЕС. Будь-які зміни в балансі навантаження ЕЕС призводять до зміни частоти, що у свою чергу призводить до додаткових втрат генерування чи браку споживання та збільшує ризик аварійного вимкнення ЕЕС. Частота ЕЕС безпосередньо пов'язана зі швидкістю обертання «традиційних» синхронних генераторів (СГ), які є основою потужних ЕЕС. На сьогодні ВЕУ ЗШО з АГПЖ не беруть участі в регулюванні частоти. Це пов'язано з конструктивними особливостями цього типу ВЕУ, оскільки використовують силову електроніку (СЕ) для часткового перетворення потужності, тобто вони не збільшують чи зменшують їхню потужність під час відхилення частоти від номінального значення. Оскільки підтримання частоти ЕЕС необхідна для забезпечення їхньої надійності і стійкості, ця проблема призведе до обмеження частки вітрових електричних станцій (ВЕС) у наявних ЕЕС. Тому постає необхідність визначення допустимої частки ВЕУ ЗШО у складі ЕЕС без суттєвого впливу на частоту чи залучення їх до регулювання частоти аналогічно до СГ [2, 3, 5].

Мета роботи – дослідити вплив ВЕУ ЗШО з АГПЖ на частоту та розробити узагальнену модель ЕЕС із ВЕУ ЗШО з АГПЖ в програмному комплексі Power Factory DIg SILENT GmbH [4] для визначення зміни частоти ЕЕС за різної частки зміни навантаження.

Результати проведеної роботи

Протягом останніх трьох десятиліть ВЕУ ЗШО набули широкого використання. Вони сконструйовані так, щоб можна було досягнути максимального аеродинамічного ефекту в широкому діапазоні швидкостей вітру [5]. За змінної швидкості вітру можливо пристосовувати швидкість обертання ВЕУ (збільшувати чи зменшувати) до швидкості вітру. Отже, співвідношення кругової швидкості зберігається постійним до визначеного значення й відповідає коефіцієнту максимальної потужності. ВЕУ ЗШО зберігають обертовий момент майже постійним – і зміни швидкості вітру поглинають зміни швидкості генератора.

На сьогодні для роботи у складі ЕЕС найширшого використання набули ВЕУ ЗШО з АГПЖ потужністю 2 МВт і більше з 5 % від встановленої потужності всіх ВЕУ у 2004 році до 60 % у 2015 році [6]. Цей тип ВЕУ розробляють багато виробників GE, Vestas, Gamesa, Repower, Nordex, Ecotecnia.

Обмотки статора АГПЖ безпосередньо приєднані до електричної мережі (ЕМ), а ротор – через силову електроніку, найчастіше з проміжною ланкою постійного струму (рис. 1). Ця система універсальна, із мінімальною вартістю обладнання й високим коефіцієнтом корисної дії (ККД), оскільки тут перетворенню піддають тільки частину потужності генератора (зазвичай близько 25 – 30%), тобто генератор працює в досить широкому діапазоні ковзання – до $\pm 30\%$ [5].

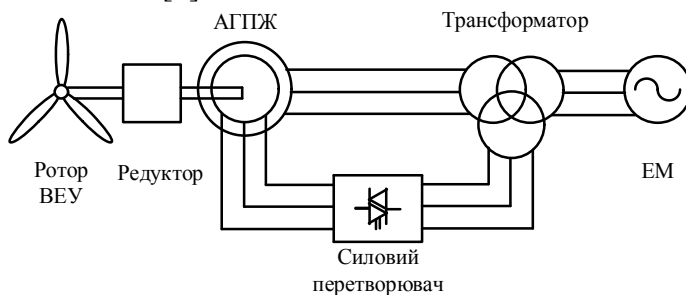


Рис. 1. ВЕУ ЗШО з АГПЖ

Максимально можливі генерування чи споживання реактивної потужності ВЕУ обмежені гранично допустимим значенням струму СЕ і рівнем активної потужності, що видається (залежно від вітрового режиму). Зазвичай регулювання реактивної потужності може бути реалізоване протягом декількох мілісекунд [5].

Основні переваги ВЕУ з АГПЖ:

- здатність контролювати напругу і коефіцієнт потужності;
- потребує СЕ невеликої номінальної потужності, що зменшує вартість;
- системи контролю постійно вдосконалюють;
- енергія ротора не розсіюється, а подається в ЕМ за допомогою СЕ;
- СЕ з боку ЕМ може виконувати компенсацію реактивної потужності і плавний пуск.

Основними їхніми недоліками є:

– необхідність застосування редуктора, оскільки швидкість обертання АГПЖ набагато вища (750 – 1500 об/хв, залежно від кількості пар полюсів) за швидкість обертання вітроколеса (10 – 25 об/хв), що призводить до підвищення витрат на технічне обслуговування, до збільшення рівня акустичного шуму;

– наявність рухливих електричних контактів (контактних кілець) істотно ускладнює конструкцію й знижує надійність ВЕУ. У нестандартних умовах навколишнього середовища щітковий контакт утрачає працездатність, створює додаткові електричні та механічні втрати, є джерелом шуму й ускладнює обслуговування АГПЖ, забруднюючи внутрішні порожнини графітовим пилом, що знижує електричну міцність ізоляції, особливо у випадку закритої системи охолодження, коли об'єм повітря обмежений;

– ковзні кільця використовують для передачі потужності ротора за допомогою СЕ, який вимагає регулярного технічного обслуговування і може бути результатом збоїв в роботі ВЕУ і електричних втрат;

– для забезпечення безперебійного режиму роботи ВЕУ під час виникнення тяжких аварій

в ЕМ необхідно використання систем захисту;

– під час коротких замикань (КЗ) великі струми статора призводять до великих струмів ротора, тому потрібно захищати СЕ від пошкоджень;

– відповідно до мережових стандартів повинні витримувати струми КЗ.

Регулювання частоти ЕЕС. Загальновідомо, що «традиційні» генератори реагують на зміни частоти, звільняючи чи поглинаючи кінетичну енергію їхніх обертових мас. На відміну від них, ВЕУ ЗШО з АГПЖ не беруть участі в регулюванні частоти, що пов'язано з конструктивними особливостями цього типу ВЕУ, оскільки використовують СЕ для часткового перетворення потужності.

На рис. 2 зображено активацію резервів залежно від часу для ситуації, коли потужна електростанція вимкнена від ЕЕС [5].

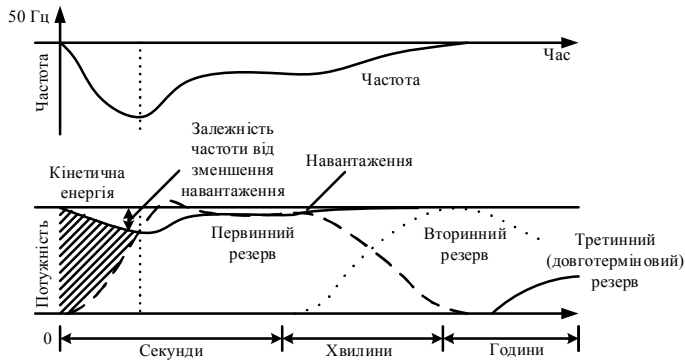


Рис. 2. Частота й активація резерву потужності у випадку вимкнення потужної електростанції

Інерція ЕЕС пропорційна кількості обертових мас в її складі [5]. Вона визначає швидкість зміни частоти після зміни навантаження. Чим більша інерція ЕЕС, тим менша швидкість зміни частоти після дисбалансу потужності. Кожного разу, коли є невідповідність між попитом і пропозицією в ЕЕС, ротори приєднаних генераторів і двигунів звільняють або поглинають кінетичну енергію – і, як наслідок, швидкість обертання і частота змінюються. Це відомо під назвою «реакція» інерції.

«Реакція» інерції буде доступна відразу ж після зміни навантаження, і її дія триватиме 3 – 5 с. Жодний контроль не буде активований протягом цього часу.

На наступному етапі після зміни навантаження, як тільки зміна частоти перевищує задане встановлене значення, регулятор швидкості відрегулює первинний двигун турбіни і таким чином затримає додаткову зміну швидкості. Початкова дія регулятора, відома як первинний (основний) контроль, установлює баланс активної потужності між генеруванням і споживанням за допомогою дії пропорційного контролю, також відомого як регулювання спаду, і перешкоджає провалу частоти [5].

Первинний резерв вмикається автоматично протягом 30 секунд після вимкнення. Вторинний резерв активується через 5 – 10 хвилин після падіння частоти. Він замінює первинний резерв і працює поки третинний (довготерміновий) резерв не активується. У нормальному режимі роботи вихідна активна потужність ВЕС може змінюватися до 15 % від встановленої потужності в діапазоні 15 хвилин. Отже, вироблена потужність ВЕС може бути задіяна в первинному та вторинному контролях. ВЕС повинні виробляти більше потужності, щоб забезпечити вторинний контроль частоти, якщо вона нижча за номінальне значення. У разі збільшення частоти в ЕЕС деякі ВЕС можуть бути вимкнені.

Правила технічної експлуатації (ПТЕ) ЕЕС вимагають участі ВЕС у первинному і вторинному регулюванні частоти, але не висувають вимог до ВЕС для регулювання частоти за допомогою «реакції» інерції. Згідно з вимогами до контролю частоти в різних країнах, частота повинна бути близькою до її номінального значення. У європейських країнах зазвичай частота повинна підтримуватися між $50 \pm 0,1$ Гц і дуже рідко коливатися між 49 і 50,3 Гц [5]. Згідно з українськими вимогами [1], у випадку відхилення частоти ВЕС

потужністю більше ніж 25 МВт має бути в змозі забезпечити регулювання частоти для стабілізації частоти в мережі (50 Гц). Точність вимірювання частоти повинна бути не меншою за ± 10 мГц. Повинна бути передбачена можливість налаштування системи регулювання частоти в діапазоні 47 Гц – 52 Гц із точністю 20 мГц.

Модель дослідження (рис. 3) розроблена в програмному комплексі Power Factory Dig SILENT GmbH [4]. На рис. 3 зображено: ЕЕС – електроенергетична система; АГПЖ – група асинхронних генераторів із подвійним живленням потужністю 2 МВт кожен; Т1, Т2 і Т3 – силові трансформатори; $U_{110\text{кВ}}$, $U_{20\text{кВ}}$, $U_{0,69\text{кВ}}$ і $U_{\text{нав}}$ – напруги на шинах 110, 20, 0,69 кВ і 0,4 кВ відповідно. Для моделювання використано моделі контролерів Power Factory Dig SILENT GmbH [4]. Установлено 60 ВЕУ ЗШО з АГПЖ, які генерують максимальну потужність 120 МВт. Задана частка статичного та динамічного складників ЕЕС – 100 і 0 % відповідно.

Для очевидності результатів моделювання розглядають вимкнення різних часток навантаження від 12 МВт – 10 % до 60 МВт – 50 % (частку навантаження беруть від частки ВЕС, тобто від 120 МВт) за час 1 с і вимірюють пікове значення частоти на шинах $U_{110\text{кВ}}$, $U_{20\text{кВ}}$, $U_{0.69\text{кВ}}$ і $U_{\text{нав}}$. У моделі дослідження (як один із варіантів можливих у програмному комплексі Power Factory Dig SILENT GmbH) ЕЕС задають потужністю КЗ, у цьому випадку – 6000 МВ·А і струмом КЗ – 31,5 кА, а саму ЕЕС вважають опорною точкою і її інерцію не задають.

Результати моделювання представлені в табл. 1 та на рис. 4.

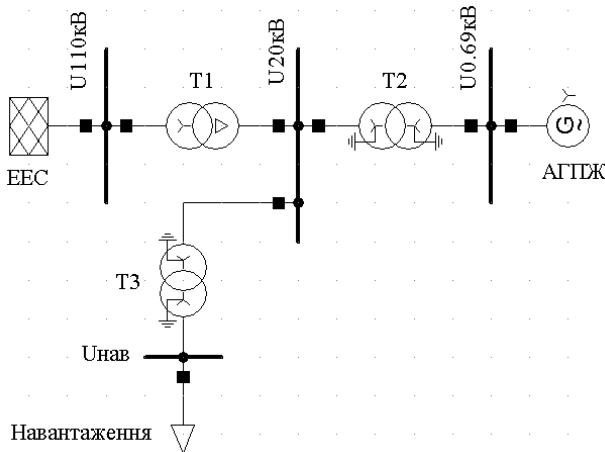


Рис. 3. ЕЕС з ВЕУ ЗШО з АГПЖ

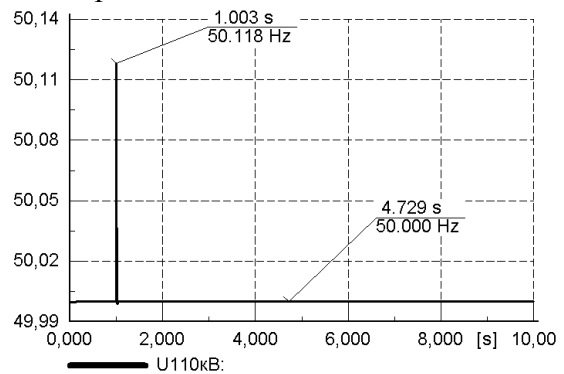


Рис. 4. Зміна частоти на шинах 110 кВ за зміни навантаження на 50 %

Таблиця 1

Зміна частоти залежно від зміни частки вимкненого навантаження

Частот а	Зміна навантаження				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
f, Гц	50,02	50,04	50,07	50,09	50,11
	4	7	1	5	8

Результати моделювання показують різну зміну частоти за зміни різної частки навантаження.

Висновки

Результати моделювання показують зміну частоти за зміни частки навантаження. Відбувається відхилення частоти, яке перевищує 50,1 Гц у випадку 50 % вимкнення навантаження, що видно на рис. 4, після чого частота повертається до свого нормального значення. Це вказує на те, що таку спрощену модель ЕЕС із вітроелектричною установкою змінної швидкості обертання з асинхронним генератором із подвійним живленням можна використовувати для визначення зміни частоти в ЕЕС за зміни частки навантаження.

Збільшення використання ВЕУ ЗШО з АГПЖ потребує необхідності оцінки їхнього впливу на частоту ЕЕС не тільки під час зміни генерування, а й під час зміни споживання, оскільки в момент генерування максимальної потужності ВЕУ не завжди є потреба у споживанні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних станцій потужністю 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. Завдання 3.3 Підключення «ВДЕ» до електричної мережі [Електронний ресурс] // Ukrainian National Electricity Regulatory Commission utilising European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) funding provided by the Global Environment Facility (GEF). – Режим доступу : http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/Wind_and_Solar_PV_Tech_Req_Final_Version_Ukrainian.pdf.
2. Сегеда М. С. Швидкість зміни частоти електроенергетичних систем в результаті збільшення частки генерованої потужності вітровими електричними станціями / М. С. Сегеда, О. Б. Дудурич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – С. 68 – 75.
3. Impact of Reduced System Inertia as a Result of Higher Penetration Levels of Wind Generation : Power Engineering Conference (UPEC) [Електронний ресурс] / М. Conlon, О. Dudurych // IEEE Xplore Digital Library. – 2014. – Р. 1 – 6. – Режим доступу : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6934801>.
4. DlgSILENT Technical Documentation Power Factory Manual Version 14.1. [Електронний ресурс] / Режим доступу : https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKFwj1luGr7qngAhUFFCwKHYanDmQQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FKouba_Nour_El_Yakine%2Fpost%2FDoes_anyone_know_where_I_can_find_a_DlgSILENT_PowerFactory_tutorial%2Fattachment%2F59d63060c49f478072ea07a5%2FAS%253A273603331854347%25401442243525988%2Fdownload%2FWhats_New_V14.1.pdf&usq=AOvVaw3ezqki0I2hKZfELJf16pvK.
5. Ackermann T. Wind Power in Power Systems [Електронний ресурс] / Т. Ackermann. – John Wiley & Sons, Ltd., 2005. – 691 р. – Режим доступу : https://simsee.org/simsee/curso2010/wind_power_in_power_systems.pdf.
6. High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. [Електронний ресурс] / V. Yaramasu, Bin Wu, P. C. Sen; S. Kouro, M. Narimani // Proceedings of the IEEE. – 2015. – №103 (5). – Р. 740 – 788. – Режим доступу : https://www.researchgate.net/publication/276913259_High-Power_Wind_Energy_Conversion_Systems_State-of-the-Art_and_Emerging_Technologies.

Сегеда Михайло Станкович – д. т. н., професор кафедри електроенергетики та систем управління; e-mail: mseheda@ukr.net.

Національний університет «Львівська політехніка».

Дудурич Олександра Борисівна – технічний спеціаліст.
MAGAL PowerInc., Canada.