

ОПЕРАТОРНІ МОДЕЛІ ВІРТУАЛЬНОЇ ІНЕРЦІЇ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТИ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ВИСОКОЮ ЧАСТКОЮ ВДЕ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У даній роботі досліджуються операторні моделі віртуальної інерції як ключовий інструмент забезпечення динамічної стабільності частоти в енергосистемах із високим рівнем проникнення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Розкривається сутність віртуальної інерції через аналогію з традиційними синхронними генераторами. Основна увага приділена математичному опису операторних передавальних функцій, які імітують інерційну відповідь перетворювачів. Робота містить аналіз ефективності різних стратегій віртуальної інерції (VSG, droop з інерційною складовою) та окреслює умови їх коректного застосування. Окремо розглядається синергія між віртуальною інерцією та системами автоматичного регулювання частоти (первинне, вторинне регулювання). Підкреслюється значення операторних моделей для проектування стійких енергосистем майбутнього з нульовим викидом вуглецю.

Ключові слова: віртуальна інерція, операторні моделі, стабілізація частоти, ВДЕ, енергосистема, перетворювачі, синхронний генератор, передавальна функція, VSG, роторна маса.

Abstract

This work investigates operator-based virtual inertia models as a key tool for ensuring dynamic frequency stability in power systems with high penetration of renewable energy sources (RES). The essence of virtual inertia is revealed through analogy with traditional synchronous generators. The primary focus is placed on the mathematical description of operator transfer functions that mimic the inertial response of power converters. The work analyzes the effectiveness of various virtual inertia strategies (VSG, droop with inertial component) and outlines the conditions for their correct application. The synergy between virtual inertia and automatic frequency control systems (primary, secondary control) is considered separately. The significance of operator models for the design of resilient future power systems with net-zero emissions is emphasized.

Keywords: virtual inertia, operator models, frequency stabilization, RES, power system, converters, synchronous generator, transfer function, VSG, rotor mass.

Вступ

Традиційна електроенергетична система, що базувалася на великих синхронних генераторах теплових, гідралічних та атомних електростанцій, володіє значною інерцією, зумовленою обертовими масами роторів. Ця інерція відіграє роль природного буфера, який автоматично протидіє раптовим змінам частоти при аварійних відключеннях генеруючих потужностей або різкому зростанні навантаження. Механічною основою цієї властивості є другий закон Ньютона для обертового руху: чим більший сумарний момент інерції, тим меншою є швидкість зміни частоти (Rate of Change of Frequency, RoCoF) під дією небалансу потужності.

Однак сучасний енергетичний перехід, зумовлений необхідністю декарбонізації та досягнення цілей сталого розвитку, кардинально змінює структуру генеруючих потужностей. Фотоелектричні панелі, вітрові турбіни та інші відновлювані джерела енергії (ВДЕ) підключаються до мережі через силові перетворювачі (інвертори), які не мають обертових мас і тому не забезпечують природної інерції. В результаті загальний рівень інерції системи (вимірюваний у мегават-секундах) стрімко знижується. Якщо раніше RoCoF після типового збурення не перевищувала 0.2-0.5 Гц/с, то в системах із домінуванням ВДЕ цей показник може сягати кількох герц за секунду, що призводить до спрацювання аварійного захисту та масштабних відключень. Вирішенням цієї проблеми є віртуальна інерція - штучна імітація інерційної поведінки синхронного генератора засобами керування перетворювачами, для опису якої застосовуються операторні моделі на основі передавальних функцій.

Результати дослідження

Для розуміння принципів віртуальної інерції необхідно розглянути математичний опис традиційного синхронного генератора як еталонної системи [1, 2]. Рівняння руху ротора синхронного генератора (рівняння маятника) в нелінійній формі записується наступним чином:

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = P_m - P_e,$$

де J — сумарний момент інерції ротора, D — коефіцієнт демпфування (демпферні обмотки), δ — електричний кут ротора, P_m та P_e — механічна потужність турбіни та електрична потужність, що віддається в мережу. В операторній формі (з використанням перетворення Лапласа) це рівняння приймає вигляд лінійної передавальної функції для малих відхилень частоти $\Delta f(s)$ відносно небалансу потужності $\Delta P(s) = P_m - P_e$:

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{2Hs + D},$$

де $H = J\omega_0^2 / (2S_{\text{ном}})$ — стала інерції (розмірність — секунди), ω_0 — синхронна частота обертання, $S_{\text{ном}}$ — номінальна потужність. Для потужного турбогенератора значення H може сягати 3–10 с, що забезпечує значну інерційну стійкість.

Для перетворювача ВДЕ, під'єданого до мережі через інвертор, стала інерції природним чином дорівнює нулю ($H = 0$). Для подолання цього обмеження використовується додатковий канал регулювання активної потужності, який керується сигналом відхилення частоти. Суть віртуальної інерції полягає у штучному введенні аналогів H_v та D_v через операторний зв'язок між додатковою активною потужністю $P_v(s)$ та відхиленням частоти $\Delta f(s)$: $P_v(s) = -G_{VI}(s) \cdot \Delta f(s)$. Операторний блок $G_{VI}(s)$ повинен мати такі властивості, щоб замкнена система «енергомережа + VSG» була стійкою та забезпечувала необхідну якість регулювання частоти згідно з вимогами Кодексу системи передачі України.

Класичний алгоритм VSG (Virtual Synchronous Generator). Цей підхід реалізує повну аналогію з рівнянням руху синхронного генератора: віртуальна активна потужність визначається інтегралом від відхилення частоти, що імітує інерційний накопичувач енергії. Операторна модель VSG має вигляд:

$$P_v(s) = -\frac{K_i}{1 + sT_i} \cdot \Delta f(s) - K_d \Delta f(s),$$

де $\frac{K_i}{1 + sT_i}$ — інтегральна складова з фільтром, що імітує інерцію, а K_d — пропорційна складова, що імітує первинне регулювання (дрооп-статизм).

Модель з дробово-раціональним оператором першого порядку. Для спрощення реалізації та зменшення обчислювального навантаження часто використовують компактнішу операторну модель:

$$G_{VI}(s) = \frac{K_v s}{1 + \tau_v s},$$

де K_v — коефіцієнт віртуальної інерції (аналог сталої часу інерції), τ_v — стала часу фільтра, яка обмежує смугу пропускання регулятора та фільтрує високочастотні шуми вимірювань.

Гібридна структура зі змінними параметрами. Для покращення перехідних режимів при великих збуреннях (наприклад, коротких замиканнях) пропонуються адаптивні операторні моделі, в яких K_v та τ_v залежать від поточного значення частоти $f(t)$ та її похідної $\frac{df}{dt}$. Такі моделі дозволяють тимчасово збільшувати коефіцієнт віртуальної інерції при аварійних зниженнях частоти, забезпечуючи додаткову підтримку в найбільш критичний момент.

Ключовим етапом синтезу системи з віртуальною інерцією є аналіз стійкості замкненої системи. Характеристичне рівняння для моделі енергосистеми з одним синхронним генератором та одним перетворювачем, оснащеним VSG, має третій порядок:

$$a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0,$$

де коефіцієнти a_i визначаються параметрами системи (H, D, K_v, τ_v та ін.). Застосування критерію стійкості Гурвіца або критерію Найквіста дозволяє визначити область допустимих значень параметрів VSG, в межах якої система залишається стійкою. Використання операторних моделей у поєднанні з частотними методами (Bode-діаграми, root locus) є стандартним інженерним підходом до проектування систем керування перетворювачами.

Теорема про стійкість системи з віртуальною інерцією (формулюється за аналогією з класичними роботами): замкнена система «енергомережа + VSG» є асимптотично стійкою при будь-яких обмежених збуреннях, якщо параметри операторної моделі задовольняють умовам $\tau_v > 0$, $K_v > 0$ та додатковим нерівностям, що випливають з умов Гурвіца. Порушення цих умов (наприклад, вибір надто великого K_v при малому τ_v) призводить до появи коливальної нестійкості з частотою в діапазоні 2–10 Гц, що є неприпустимим.

Великі ВЕС/СЕС (100–200 МВт), підключені до магістральних мереж, згідно з вимогами ENTSO-E та НЕК «Укренерго» мають надавати послуги з підтримки частоти, зокрема віртуальну інерцію. Операторні моделі дають змогу налаштовувати K_v і τ_v для окремих генераторів або станцій в цілому, імітуючи поведінку синхронного генератора, з обов'язковою координацією, щоб уникнути «паразитних» коливань між VSG.

В ізольованих системах (острови, віддалені об'єкти), де немає потужного синхронного генератора, частоту та напругу забезпечують BESS. Віртуальна інерція, реалізована через операторні моделі, критична для стабільності частоти при змінах режиму та навантаження. Модель $G_{VI}(s)$ доповнюють нелінійними обмеженнями (кулонівська ефективність, глибина розряду, потужність).

Основні показники якості – frequency nadir і RoCoF. Правильно налаштована VSG знижує RoCoF у 2–4 рази, підвищує nadir і запобігає спрацюванню UFLS. Параметри визначають на етапі проєктування за допомогою імітаційного моделювання (MATLAB/Simulink, PSCAD, PowerFactory) на основі операторних рівнянь.

VSG працюють паралельно з традиційними регуляторами:

1. Первинне регулювання (дрооп, $\sigma = 4 - 5\%$ стала часу сервомеханізму 0.5–2 с) – повільніше.
2. Вторинне (AGC, десятки секунд – хвилини) – відновлює номінальну частоту.

Головне завдання – уникнути резонансної взаємодії швидкої VSG і повільного AGC. Розв'язують підбором K_v , τ_v (наприклад, введенням фільтра нижніх частот у канал VSG).

Найпоширенішим непорозумінням є уявлення про те, що віртуальна інерція не потребує реальних енергетичних затрат. Насправді, будь-яке відхилення активної потужності ΔP для імітації інерційного відгуку має бути взяте з конкретного джерела [3, 4]:

- Якщо це BESS (системні накопичувачі): енергія безпосередньо витрачається з акумулятора, збільшуючи кількість циклів його заряду/розряду.

- Якщо це ВЕС або СЕС: станціям доводиться працювати в режимі штучного розвантаження (*deloaded operation*). Це означає, що об'єкт генерує не максимально можливу на цей момент потужність, а дещо меншу, резервуючи «інерційний капітал»

Наслідок: Робота в такому режимі призводить до перманентної недовиробки електроенергії та зниження загальної економічної ефективності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Віртуальна інерція не замінює, а доповнює традиційні методи регулювання частоти, діючи на різних часових шкалах:

- Віртуальна інерція (VSG). Найшвидша, але короткочасна. Вмикається протягом мілісекунд після виникнення небалансу потужності, триває 1–10 секунд. Її основна мета — зменшити RoCoF та дати час для вмикання повільніших регуляторів.

- Первинне регулювання (дрооп). Швидкість — секунди, тривалість — постійна. Стабілізує частоту на новому стаціонарному значенні, але не повертає її до номіналу (наявність статичної помилки).

- Вторинне регулювання (AGC). Швидкість — десятки секунд — хвилини. Повертає частоту до номіналу (усуває статичну помилку), відновлює плановий баланс потужностей.

Разом усі три контури утворюють систему ієрархічного регулювання. Передавальна функція розімкненої системи "енергомережа + ВДЕ + традиційні генератори" має вигляд:

$$G_{op}(s) = \frac{1}{2H_{eq}s + D_{eq}} + G_{VI}(s) + G_{droop}(s) + G_{AGC}(s).$$

Кожен з доданків має свою характерну передавальну функцію: $G_{droop}(s)$ зазвичай є пропорційним (або пропорційно-інтегральним) регулятором, $G_{AGC}(s)$ — інтегратором з великою сталою часу. Проєктування такої багатоконтурної системи виконується з використанням частотних методів, зокрема діаграм Бode та логарифмічних частотних характеристик.

Висновки

Операторні моделі віртуальної інерції є фундаментальним математичним апаратом для опису динаміки перетворювачів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у задачах стабілізації частоти. Використання передавальних функцій та частотних методів дозволяє синтезувати алгоритми керування віртуальними синхронними генераторами (VSG) з наперед визначеними властивостями стійкості, що дає змогу ефективно інтегрувати великі вітрові, сонячні станції та системи накопичення енергії до сучасних енергосистем. Така практична реалізація віртуальної інерції у вигляді операторних моделей першого або вищого порядку забезпечує виконання жорстких вимог Кодексу системи передачі та стандартів ENTSO-E.

Водночас для коректного застосування цих моделей і запобігання конфлікту регуляторів критично важливо враховувати їхні обмеження, такі як енергетична вартість віртуальної інерції, необхідність точної ідентифікації параметрів та проблеми масштабування на велику кількість перетворювачів. Саме тому подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних та робастних моделей, здатних підлаштовувати свої параметри K_v та τ_v до змін режиму роботи мережі, а також на застосування нейромережевих і нечітких регуляторів для синтезу нелінійних моделей, які точніше відтворюють поведінку реального синхронного генератора. У контексті євроінтеграції України та синхронізації нашої ОЕС із ENTSO-E, впровадження таких підходів стає необхідною умовою для сертифікації нових генеруючих потужностей і гарантування загальної надійності енергопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Голомозий В. В., Калініченко М. В., Царьова Л. В. та ін. Теорія ймовірностей та математична статистика: підручник / за ред. В. В. Голомозія. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 415 с.
2. Козловська І. М. Основи теорії ймовірностей : навч. посіб. – Київ : Центр навчальної літератури, 2020. – 280 с.
3. Казимир В. Я., Стоцький Я. В. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. – 312 с.
4. Войчак Ю. М., Войчак Т. П., Демченко Н. В. Статистичні методи аналізу даних : навч. посіб. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 292 с.

Шпак Віктор Сергійович, Вінницький національний технічний університет, Факультет електроденергетики та електромеханіки, 1-й курс, група ЕС-25б, shpakvictor2912@gmail.com

Сачанюк-Кавецька Наталія Василівна - к. т. н., доцент. Вінницький національний технічний університет, кафедра вищої математики, skn1901@gmail.com

Науковий керівник: **Сачанюк-Кавецька Наталія Василівна** - к. т. н., доцент, Вінницький національний технічний університет, кафедра вищої математики, skn1901@gmail.com

Shpak Viktor S., Vinnytsia National Technical University, Faculty of Electric Power Engineering and Electromechanics, 1st year, group ES-25b, shpakvictor2912@gmail.com

Sachaniuk-Kavetska Natalia V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, skn1901@gmail.com

Supervisor: **Sachaniuk-Kavetska Natalia V.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, skn1901@gmail.com