

Параметрична оптимізація регуляторів векторного управління інвертором

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.093>

Микола Клепач

Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
m.i.klepach@nuwm.edu.ua

Марко Клепач

Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
m.m.klepach@nuwm.edu.ua

Яніслав Федоров

Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
fedorov_ak22@nuwm.edu.ua

Анотація — досліджено модель автоматичної системи векторного управління статичного синхронного компенсатора реактивної потужності трифазного споживача електричної енергії, оптимізовано параметри регулятора стабілізації напруги інвертора. Результати можуть бути використані при реалізації пристрою мікропроцесорними засобами автоматизації.

Ключові слова — синхронні компенсатори реактивної потужності, автономні інвертори напруги, векторне управління, оптимізація параметрів PID-регуляторів.

I. ВСТУП

Із розвитком напівпровідникової техніки та DSP мікроконтролерів, швидкодіючих IGBT і MOSFET транзисторів, а також давачів струму і напруги на основі ефекту Хола з'явилася можливість реалізації активних силових пристроїв для покращення якості електроенергії електричних мереж. Основними елементами активних фільтрів електроенергії є автономний інвертор включений паралельно чи послідовно із нелінійним навантаженням, накопичувач електричної енергії та система управління.

У залежності від стратегії управління ці пристрої дозволяють формувати на навантаженні напругу з необхідними параметрами та регулювати їх у широких межах. Вони споживають із електричної мережі струм близький до синусоїдального при нульовому значенні реактивної потужності та забезпечують електромагнітну сумісність пристроїв.

Сучасними досконалими технічними засобами для регулювання реактивної енергії і симетрування навантажень є статичні синхронні компенсатори — СТАТКОМ. Вони забезпечують компенсацію реактивної потужності, дозволяють підтримувати стабільну напругу в мережі та підвищують її якість.

Високопродуктивним методом керування інверторами напруги в цих пристроях є векторний

метод керування, який забезпечує миттєву корекцію модулів та фаз генерованих струмів. Техніка векторного управління трифазних інверторів потребує використання засобів моделювання, та оптимізації параметрів вбудованих регуляторів

II. МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

За принципом дії компенсатор реактивної потужності є синхронним джерелом напруги під'єднаним паралельно до активно-індуктивного навантаження (Load) через LCL фільтр. Трифазний мостовий інвертор (INVERTER) побудований за мостовою схемою на IGBT-транзисторах включає також накопичувальний конденсатор. Інвертор генерує реактивну потужність, яка в точці під'єднання компенсує реактивну потужність споживану навантаженням[1].

У процесі проведення досліджень нами побудовано Simulink-модель силової частини із засобами вимірювання (рис.1). В наведеній віртуальній фізичній моделі компенсатора використано блоки Power Electronics з бібліотеки Simscape [2]. У процесі моделювання для системи задано наступні параметри. Живлення споживача з активною потужністю 200 kW та індуктивною 100 kvar відбувається від мережі 0.4 kV. На стороні постійного струму інвертора підтримується постійна напруга $U_{dc}=800$ V. Частота широтно-імпульсної модуляції фіксована 10 kHz.

Для оптимізації параметрів PI-регуляторів використано блок оптимізації нелінійних систем Check Step Response Characteristics.

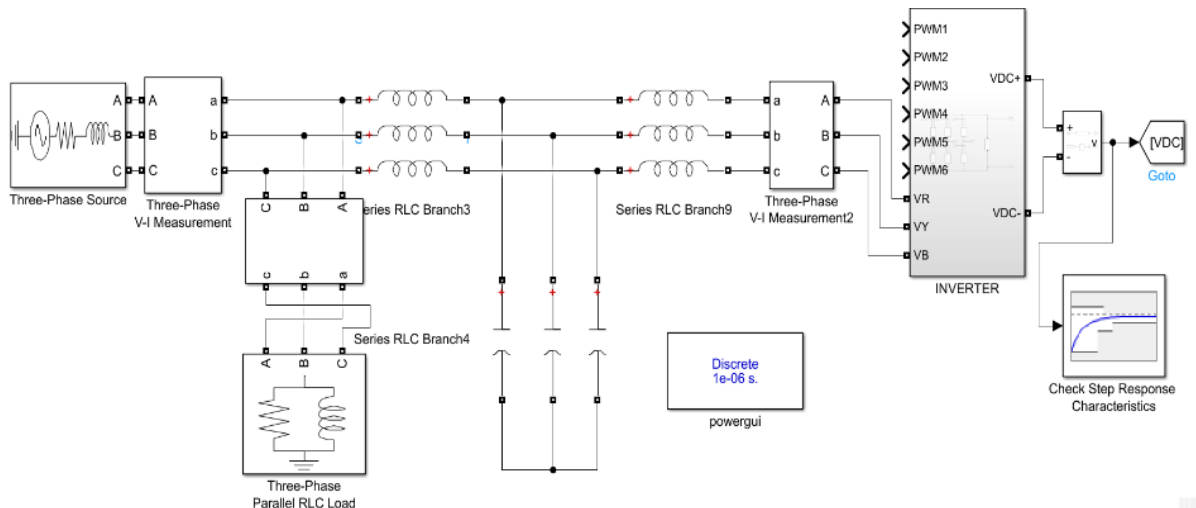


Рисунок 1. Simulink-модель силової частини компенсатора

Для реалізації векторного управління інвертором побудована модель прямих перетворень координатних систем Кларк і Парка (рис.2).

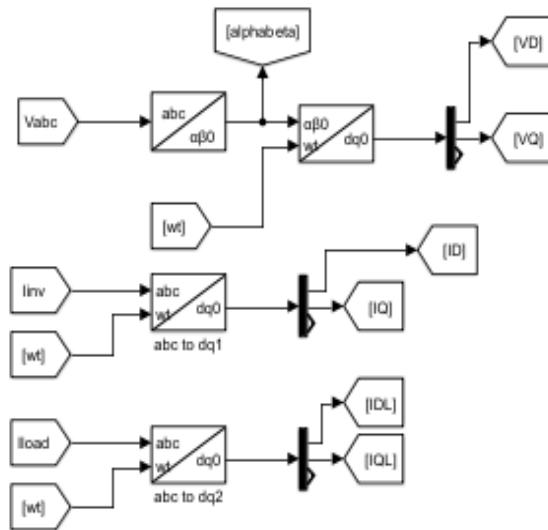


Рисунок 2. Модель перетворювачів координат

Фазове автопідстроювання частоти (PLL Phase-locked Loop) синхронізується за прямою послідовністю входньої напруги V1.

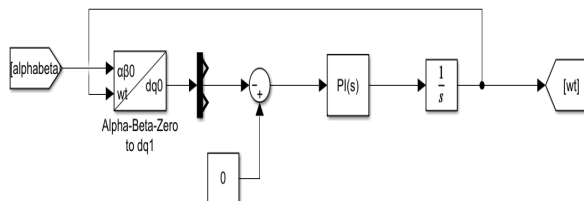


Рис.3. Модель АСР автопідстроювання частоти

Вихідне значення автоматичної системи підстроювання частоти $\Theta = \omega t$ використовується при обчисленнях дійсної (поздовжньої) VD і реактивної (поперечної) складової VQ входньої напруги Vabc в обертовій системі координат dq.

Вимірювані миттєві значення струмів навантаження I_{load} та інвертора I_{inv} перераховуються у відповідні складові цих струмів в системі координат, яка обертається з кутовою частотою ω синхронно з напругою фази A. На рис.2 ці струми мають позначення IDL, IQL та ID, IQ.

Складові ID збігається по фазі із напругою регулюючи потік активної потужності, тоді як складові IQ відповідає за величину реактивної потужності генерованої інвертором.

Система векторного управління складається із двох каналів: - схеми стабілізатора напруги каналу постійного струму VDC і регулятора реактивної складової струму навантаження IQ та оберненого перетворювача координат від рухомої системи dq0 до трифазної системи abc. (рис.4)[3].

На основі вимірних значень параметрів здійснюється обрахування сигналу завдання, що являє собою різницю між ідеальною (заданою) синусоїдою та струмом навантаження в вибраній системі координат. На основі отриманого сигналу завдання після зворотного перетворення координат отримуємо керуючий ШІМ сигнал в векторній формі, під дією якого силова частина активного фільтра шляхом комутації силових ключів задає струм інвертора, який компенсує спотворюючий струм нелінійного навантаження.

Ефективність роботи синхронного компенсатора реактивної потужності залежить від якості автоматичного регулювання каскадної системи стабілізації напруги на виході інвертора. В системі регулювання задіяні два регулятори коректуючий PID controller1 та стабілізуючий PID controller2.

Алгоритми роботи цифрових PI-регуляторів в системі стабілізації напруги на виході автономного інвертора напруги описується дискретною передаточною функцією:

$$W_{PID}(z) = P + IT_0 \frac{1}{z-1}$$

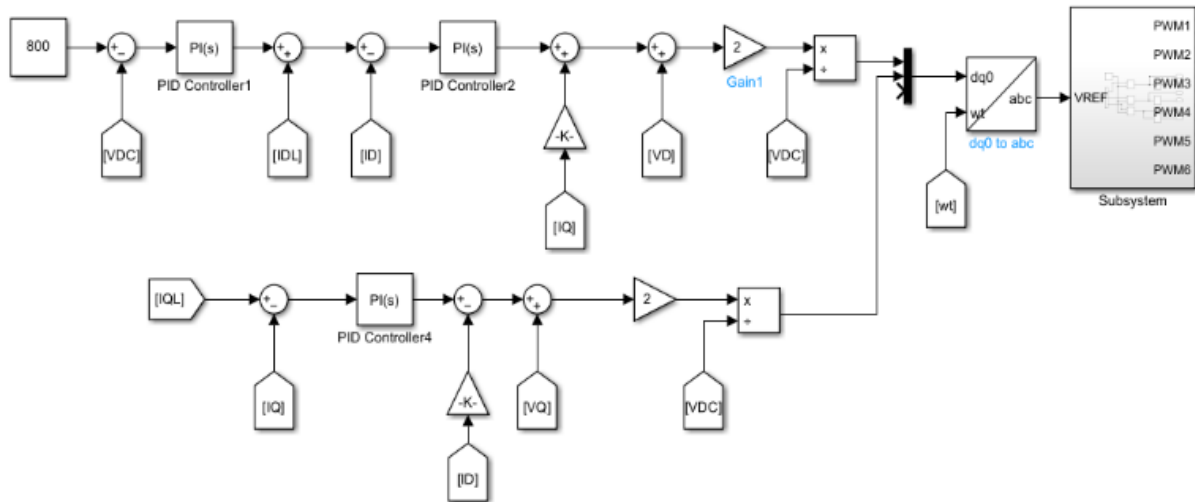


Рисунок 4. Simulink-модель системи векторного управління СТАТКОМ

III. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Засоби пакету MATLAB дозволяють оперативно здійснити параметричний синтез регуляторів каскадної автоматичної системи регулювання. На рис.5. показано налаштування блоку оптимізації нелінійних систем Check Step Response Characteristics для системи стабілізації напруги VDC.

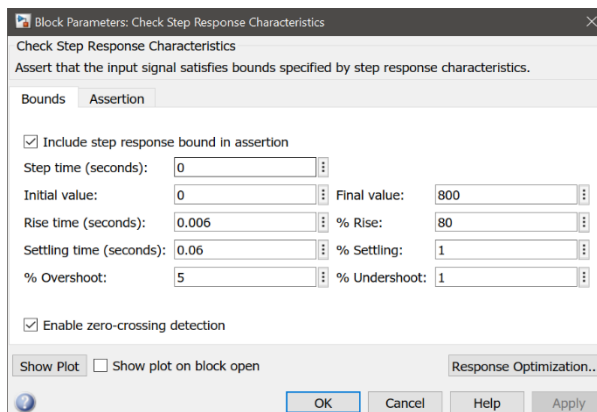


Рисунок 5. Вікно параметрів блока Check Step Response Characteristics

Перехідні характеристики АСР напруги інвертора отримані в результаті оптимізації наведено на рис.6.

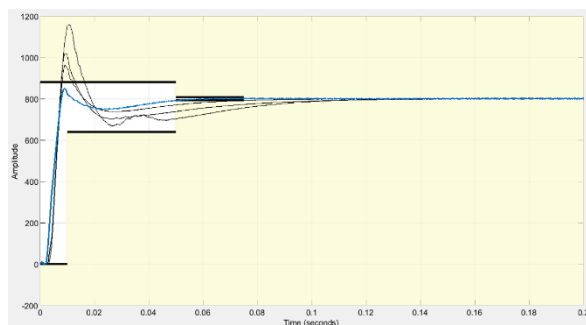


Рис.6. Перехідні характеристики АСР напруги інвертора

За результатами моделювання та оптимізації регуляторів отримано оптимальні значення параметрів регуляторів (рис.7):

Data Browser	
Search workspace variables	
▼ MATLAB Workspace	
Name	Value
ki1	79.3406
ki2	196.3...
kp1	1.1452
kp2	165.23...

Рисунок 7. Оптимальні значення параметрів регуляторів

Отримані значення параметрів kp1 та kp2 відповідають пропорційній складовій, а ki1 та ki2 – інтегральній складовій коректуючого та стабілізуючого регулятора відповідно.

IV. ВИСНОВКИ

Отримані у результаті оптимізації параметри регуляторів активного випрямляча забезпечують перерегулювання до 5% та скорочення часу перехідного процесу до 0.05 s. Результати досліджень можуть бути корисними при налагодженні перетворювачів та реалізації їх в мікропроцесорних системах.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Liserre, M.; Blaabjerg, F.; Hansen, S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. IEEE Trans. Ind. Appl. 2005, 41, 1281–1291.
- [2] Three phase active rectifier (Front and converter). [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://youtu.be/Lh4shWrxlqI?si=KG0vBE72DfRk14z4>
- [3] Three phase Phase STATCUM for Reactive Power Compensation MATLAB Simulation [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://youtu.be/JForZkZgtbM?si=UfU84NpvsS8dQ5RM>