

**В. С. НОЗДРЕНКОВ, М. В. ПЕТРОВСЬКИЙ, В. В. ВОЛОХІН, А. В. ПАВЛОВ**

## **ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ**

В умовах постійного розвитку розподілених джерел електроенергії з'явилась необхідність інтегрування їх у загальну електромережу. Але процес інтегрування повинен враховувати не тільки параметри керування розподіленим джерелом живлення, а й враховувати паралельну роботу декількох таких джерел та параметри енергосистеми у цілому. На самому високому рівні керування потрібно також враховувати економічні показники, які формуються енергоринком. Для здійснення інтегрування можуть ефективно використовуватися спеціальні прилади – керовані інвертори. Найбільш складною задачею є вибір системи управління для керованих інверторів. Існує багато різноманітних систем управління, наприклад, пропорційно-інтегральні, Deadbeat регулятори тощо. Метою даної роботи є побудова інформаційної моделі управління розподіленими джерелами живлення. Для контролю активної та реактивної потужності використовується метод контролю за струмом. Перевагою контролю за струмом є стійкість до варіації параметрів інвертора та зовнішньої мережі, відмінні динамічні показники та більша точність контролю. Запропонований варіант побудови системи автоматичного керування використовує стратегію Internal model control та враховує обмеження на керуючу змінну. Перевагами системи з Internal model control регулятором у порівнянні зі звичним пропорційно-інтегральним регулятором є використання потужного методу керування на основі моделі об'єкту, можливість впливати на нечутливість системи окремим параметром налаштувань, підвищена швидкодія при майже повній відсутності перерегулювання, полегшена процедура налаштування. Така система пропонується для використання в об'єктах, де висуваються жорсткі вимоги до мінімізації перерегулювання та швидкості відпрацювання збурень і завдань. Для моделювання результатів роботи використано програмний комплекс PSCAD.

**Ключові слова:** математична модель, розподілене джерело живлення, регулювання потужності, активна потужність, реактивна потужність.

**V. S. NOZDRENKOV, M. V. PETROVSKYI, V. V. VOLOKHIN, A. V. PAVLOV**

## **INFORMATION CONTROL MODEL OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES**

Currently, there is a constant growth of distributed energy resources, it became necessary to integrate them into the power grid. However, the integration process must consider not only the control parameters of the distributed energy resource but also the parallel operation of several such resources, the parameters of the power system as a whole. At the highest level of control, it is also necessary to consider the economic indicators formed by the energy market. Special devices – controlled inverters – can be effectively used for integration. The most difficult task is choosing a control system for controlled inverters. There are many different control systems such as Proportional-Integral, Deadbeat controllers, etc. The purpose of this paper is to build an information model for controlling distributed power resources. The current control method was used to control active and reactive power. The advantage of current control is resistance to variations in the parameters of the inverter and the external grid, excellent dynamic performance, and higher control accuracy. The proposed approach for building an automatic control system using the Internal model control strategy and taking into account restrictions on the control variable. The advantages of a system with an Internal model control controller compared to a conventional Proportional-Integral controller are the use of a powerful control method based on the object model, the ability to influence the roughness of the system with a separate setting parameter, increased speed with almost complete absence of over-regulation, simplified setup procedure. Such a system is proposed for use in facilities with strict requirements to minimize over-regulation and the speed of working out disturbances and tasks. The PSCAD software app was used to model the work results.

**Keywords:** mathematical model, distributed energy resources, power regulation, active power, reactive power.

**Вступ.** Величина електроенергії, яка подається в електричну мережу від розподілених електростанцій, потенційно може створити проблеми для операторів енергосистем. Ці проблеми варіюються від коливань напруги та зворотного потоку потужності до перегріву компонентів. Збільшення надходження електроенергії до електромережі вимагає значного посилення мережі, особливо в розподільних мережах, де стабільність напруги є обов'язковою. Факторами, що спонукають до збільшення рівня проникнення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), є надійність, безпека, прогрес у технологіях, нормативні проблеми та проблеми зі скороченням викидів. Крім того, зростання конкуренції на ринку електроенергії, проблеми застарілого мережевого обладнання та обмеження потужності спонукали до прийняття технологій розподіленої генерації (РГ) як частини нових енергосистем для вирішення цих проблем [1]. У нинішньому дерегульованому секторі електроенергетики інвестори зазвичай скептично ставляться до інвестиційних рішень щодо енергетичних проєктів, які передбачають величезні суми через надзвичайно довгі періоди

окупності. Ці фактори, а також дерегуляція / децентралізація сектору електроенергії разом зі зростаючим глобальним споживанням електроенергії зробили РГ-технології стабільним варіантом електропостачання в найближчому майбутньому [2]. В електромережах, де домінують розподілені системи відновлюваної енергії, може виникнути велике перевантаження мережі через збільшення виробництва електроенергії з розподілених систем відновлюваної енергії, яке не відповідає зростаючому попиту на електроенергію [3].

**Мета статті.** Метою статті є розробка інформаційної моделі та стратегії управління розподіленими джерелами живлення. Модель повинна враховувати не тільки показники первинного рівня – струм, напруга та опір, а й рівні електромережі та енергоринку.

**Інформаційна модель управління розподіленими джерелами живлення.** В загальному випадку можна виділити три рівні управління розподіленими джерелами живлення [4] (рис. 1).

© В. С. Ноздренков, М. В. Петровський, В. В. Волохін, А. В. Павлов, 2024

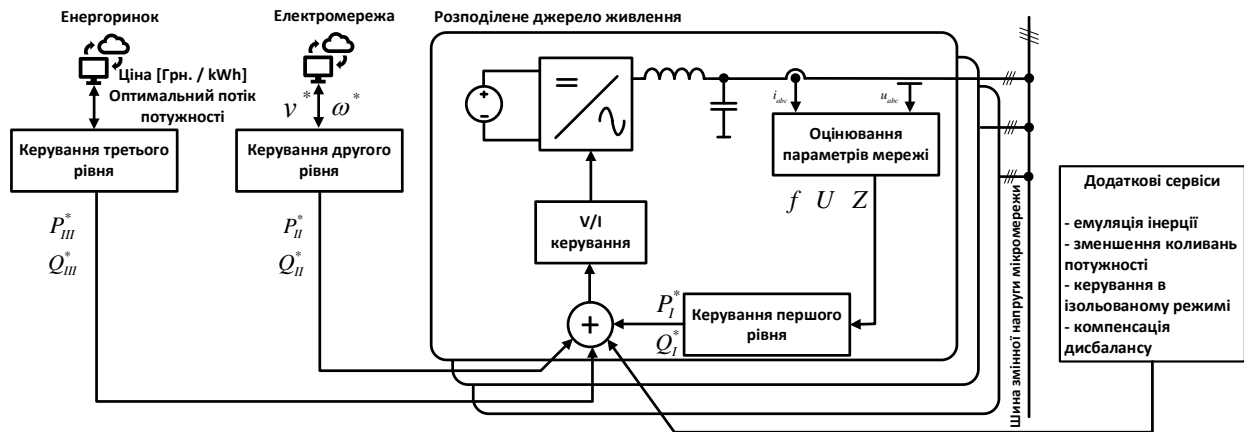


Рисунок 1 – Інформаційна модель управління розподіленими джерелами живлення

На першому рівні керування (рис. 1) аналізуються параметри електричної мережі і формуються значення  $P_I^*$  та  $Q_I^*$ , які може видати конкретне розподілене джерело живлення. На другому рівні встановлюються значення  $P_{II}^*$  та  $Q_{II}^*$ , які мінімізують відхилення напруги та частоти від номінальних значень. На третьому рівні встановлюються значення потужності  $P_{III}^*$  та  $Q_{III}^*$  оптимальні з економічної точки зору, беручи до уваги ціну генерації джерела, доступність джерела, ціну придбання енергії та цілі прибутку.

**Система управління перетворювачем джерела напруги.** Схема управління перетворювачем джерела напруги наведена на рис. 2. Існує два режими управління перетворювачем: управління струмом та управління напругою. Управління джерелом струму: перетворювач відстежує опорні значенням потужності та подає струм у фазі мережі завдяки блоку синхронізації фазового автопідналаштування частоти [5]. Це відповідає режиму генерації потужності, який також називається режим відстеження мережі. У режимі підтримки мережі перетворювач регулюється для забезпечення мережі. Управління джерелом напруги: перетворювач працює як джерело напруги і тому може працювати в ізолюваному режимі. Він використовує варіації потужності для синхронізації з мережею, так що фазове автопідналаштування частоти більше не потрібне.

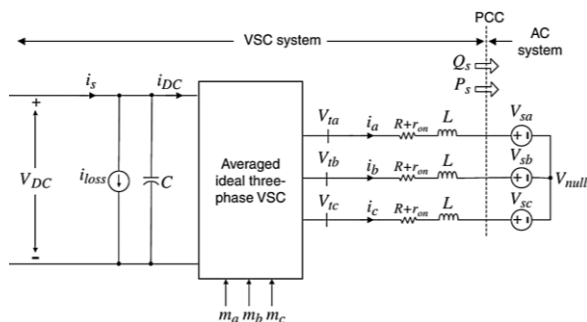


Рисунок 2 – Система управління джерелом напруги

**Вибір системи координат.** Напівмостовий перетворювач є основним будівельним блоком трифазного перетворювача напруги, і трифазне управління перетворювачем має справу з одночасним

керуванням трьома напівмостовими перетворювачами. Поки тільки пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор може дозволити системі напівмостового перетворювача відстежувати команду постійного струму, регулятор має бути вищого порядку та пропускну здатності, якщо потрібно відстежувати синусоїдну команду. В трифазній системі нас цікавить відстеження синусоїдальної напруги. Можна зазначити, що  $\alpha\beta$  система координат і  $dq$  система координат, два основних класи двовимірних систем координат. Відомо, що  $\alpha\beta$  система координат дозволяє трансформувати задачу керування системою трьох напівмостових перетворювачів до еквівалентної задачі керування двома еквівалентами підсистеми. Крім того, можна визначити поняття миттєвої реактивної потужності в  $\alpha\beta$  системі координат [6]. Відомо, що  $dq$  система координат має ті ж переваги, що й  $\alpha\beta$ , але з доповненням. Якщо керування здійснюється в  $dq$  системі координат, задача відстеження синусоїдальної величини перетворюється на еквівалентну проблему відстеження постійної величини. Отже, для контролю можна використовувати ПІ-регулятори. У  $abc$  системі координат моделі конкретних типів електричних машин демонструють зміну в часі, взаємно зв'язаних індуктивних елементів. Якщо модель виражена в  $dq$  системі координат, змінні за часом індуктивності перетворюються на (еквівалентні) постійні параметри. Традиційно аналізуються компоненти великих енергетичних систем в  $dq$  системі координат [6]. Отже, представлення систем інверторів у  $dq$  системі координат дає змогу аналізувати та розробляти завдання на основі загальноприйнятих методологій, які використовуються для енергосистем, в уніфікованій структурі.

**Управління за струмом.** Основні рівняння для схеми управління рис. 3 можна записати в такому вигляді:

$$L \frac{di_d}{dt} = L\omega_0 i_q - (R + r_{on})i_d + V_{td} - V_{sd},$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -L\omega_0 i_d - (R + r_{on})i_q + V_{tq} - V_{sq}, \quad (1)$$

в яких

$$V_{td}(t) = \frac{V_{DC}}{2} m_d(t),$$

$$V_{tq}(t) = \frac{V_{DC}}{2} m_q(t). \quad (2)$$

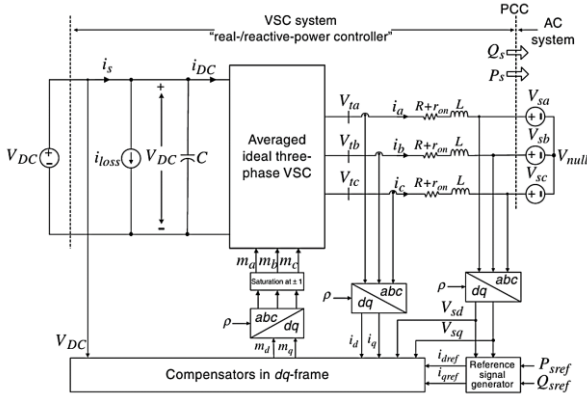


Рисунок 3 – Схема управління джерелом напруги за струмом

В рівнянні (1)  $i_d$  та  $i_q$  це змінні стану,  $V_{td}$  та  $V_{tq}$  входи управління,  $V_{sd}$  та  $V_{sq}$  це входи збурення. Завдяки наявності  $L\omega_0$  в рівнянні (1) динаміка  $i_d$  та  $i_q$  взаємопов'язана. Щоб їх зробити незалежними ми визначаємо  $m_d$  та  $m_q$  як:

$$m_d = \frac{2}{V_{DC}} (u_d - L\omega_0 i_q + V_{sd}),$$

$$m_q = \frac{2}{V_{DC}} (u_q - L\omega_0 i_d + V_{sq}), \quad (3)$$

де  $u_d$  та  $u_q$  нові входи управління. Підставляємо їх в (2) і отримуємо рівняння (4). Рівняння (3) описують дві роз'єднані лінійні системи першого порядку. На основі (3),  $i_d$  та  $i_q$  можна керувати  $u_d$  та  $u_q$  відповідно.

$$L \frac{di_d}{dt} = -(R + r_{on})i_d + u_d,$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -(R + r_{on})i_q + u_q. \quad (4)$$

На рис. 4 показано блочне представлення регуляторів струму  $d$ - і  $q$ -вісей системи інвертора, де  $u_d$  та  $u_q$  є виходами двох відповідних компенсаторів. Вісь  $d$  компенсатору формує  $e_d = i_{dref} - i_d$  і забезпечує  $u_d$ . Тоді, виходячи з (3),  $u_d$  є складовою частиною  $m_d$ . Подібним чином компенсатор осі  $q$  формує  $e_q = i_{qref} - i_q$  і забезпечує  $u_q$ , який, на основі (3), є складовою частиною  $m_q$ . Потім інвертор підсилює  $m_d$  і  $m_q$  на коефіцієнт  $V_{DC}/2$  і генерує  $V_{td}$  та  $V_{tq}$ , які, в свою чергу, контролюють  $i_d$  та  $i_q$  на основі (1). На основі вищезазначеного процесу контролю можна накреслити спрощену блок-схему керування рис. 5, яка є еквівалентною до системи керування на рис. 4. Слід зазначити, що в системі управління на рис. 4 в

стаціонарному стані усі сигнали керування, прямого та зворотного зв'язку є величинами постійного струму.

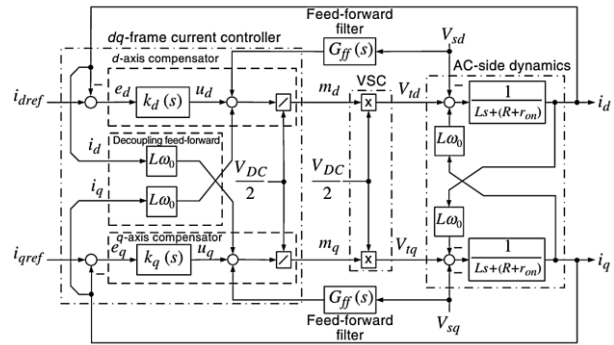


Рисунок 4 – Блочне представлення регулятора

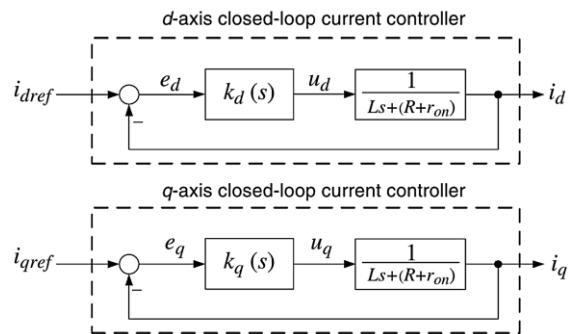


Рисунок 5 – Спрощена схема струмового управління

Рис. 5 показує, що контрольні блоки за обидвома  $d$ - та  $q$ -вісями є ідентичними між собою. Таким чином, відповідні компенсатори також можуть бути ідентичними. Розглянемо  $d$ -вісь. Компенсатор  $k_d(s)$  може бути простим ПІ компенсатором, що дозволяє відслідковування базового постійного сигналу. Наприклад,

$$k_d(s) = \frac{k_p s + k_i}{s}, \quad (5)$$

де  $k_p$  та  $k_i$  є пропорційним та інтегральним коефіцієнтами підсилення відповідно. Тоді, коефіцієнт підсилення кола:

$$l(s) = \left( \frac{k_p}{Ls} \right) \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s + \frac{R+r_{op}}{L}}. \quad (6)$$

Слід відмітити, що у зв'язку з наявністю полюса  $s = -(R + r_{op})/L$ , який досить близький до початку координат, амплітуда та фаза підсилення кола починає знижуватись починаючи з відносно низьких частот. Таким чином, полюс спочатку скасовується нулем компенсатора при  $s = -k_i/k_p$ , і коефіцієнт посилення кола стає рівним  $l(s) = k_p/(Ls)$ . Тоді передаточна функція замкнутого контуру, яка є  $l(s)/(1 + l(s))$ , стає рівною:

$$\frac{I_d(s)}{I_{dref}(s)} = G_i(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1}, \quad (7)$$

якщо

$$k_p = L/\tau_i, \quad (8)$$

$$k_i = (R + r_{op})/\tau_i, \quad (9)$$

де  $\tau_i$  є сталою часу результуючого замкнутого контуру.

Рівняння (7) показує, якщо  $k_p$  та  $k_i$  вибрані на основі (8) та (9), то відповідь вихідного сигналу  $i_d$  на  $i_{dref}(t)$  оснований на базі передаючої функції першого порядку, чия стала часу  $\tau_i$  може бути обрана довільно.  $\tau_i$  повинна бути обрана малою для швидкої відповіді, але і адекватно великою, щоб  $1/\tau_i$ , тобто ширина смуги частот системи управління із зворотним зв'язком, була значно менше, наприклад, у 10 разів, ніж частота перемикання інвертора. Залежно від вимог конкретного застосування і частоти перемикання перетворювача,  $\tau_i$  вибирають в межах 0,5–5 мс. Аналогічний компенсатор, як  $k_d(s)$ , може бути застосований і для компенсатора  $k_q(s)$  за  $q$ -віссю.

**Синтез системи управління за внутрішньою моделлю об'єкта.** Нижче запропонований варіант побудови системи автоматичного керування з використанням стратегії Internal model control (ІМС) та врахування обмежень на керувану змінну [7, 8]. ІМС спочатку був розроблений для хімічної промисловості і розглядався як робастний метод управління. Під поняттям «робастність» у роботі розуміється здатність зберігати високі показники якості керування в умовах параметричних збурень об'єкта керування.

Структура такої системи зображена на рис. 6. Структура використовує внутрішню модель  $\hat{G}(s)$ , яка з'єднана паралельно з об'єктом керування  $G(s)$ . В контур керування додається блок  $C(s)$  – ІМС модуль.  $\hat{G}(s)$ ,  $G(s)$  і  $C(s)$  це матричні передаточні функції. Слід зазначити, що ІМС це особливий випадок класичної структури управління, яка наведена на рис. 7. Перевагами системи з ІМС-регулятором у порівнянні зі звичним ПІ-регулятором є використання потужного методу керування на основі моделі об'єкта, можливість впливати на нечутливість системи окремим параметром налаштувань, підвищена швидкість при майже повній відсутності перерегулювання, полегшена процедура налаштування. Така система пропонується для використання в об'єктах, де висувуються жорсткі вимоги до мінімізації перерегулювання та швидкості відпрацювання збурень і завдань [9].

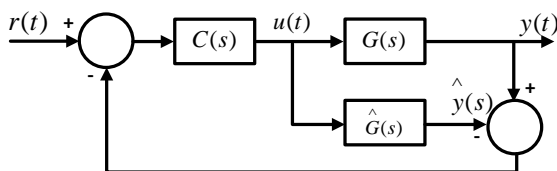


Рисунок 6 – Структура ІМС регулятора

Складовими частинами такої системи є модель об'єкта керування та ІМС-регулятор. ІМС-регулятор містить у собі частину моделі об'єкта керування, яка може бути обернена, та фільтр. Фільтр призначений

для зменшення впливу похибок при визначенні моделі та підвищенні нечутливості системи.

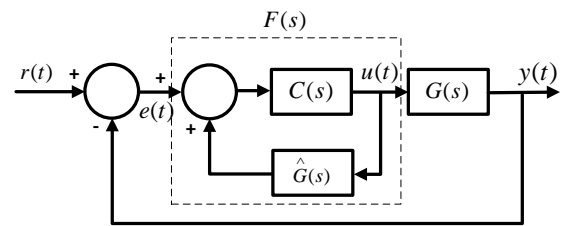


Рисунок 7 – ІМС регулятор в класичній формі

Синтез системи з внутрішньою моделлю починається з визначення структури моделі та представлення її у вигляді двох частин: такої, що може бути оберненою та такою, що не може (транспортні запізнення та елементи, які матимуть додатні нулі).

Тобто,

$$G(s) = G_A(s)G_M(s), \quad (10)$$

де  $G_M(s)$  – частина моделі, яка може бути обернена,  $G_A(s)$  – частина моделі, яка не може бути обернена.

Далі  $G_M(s)$  включається до складу регулятора.

$$C(s) = G_M^{-1}(s). \quad (11)$$

Для зменшення впливу похибок при визначенні моделі та підвищенні стійкості системи до складу  $C(s)$  вводиться фільтр  $L(s)$  – фільтр нижніх частот.

$$L(s) = \text{diag} \left[ \begin{array}{c} \frac{a_1^n}{(s + \alpha_1)^n}, \frac{a_2^n}{(s + \alpha_2)^n}, \\ \dots, \frac{a_{n_y}^n}{(s + \alpha_{n_y})^n} \end{array} \right], \quad (12)$$

де позитивне ціле  $n$  вибирається досить великим, щоб  $C(s)$  стало відповідним.

Таким чином, замкнута система буде робастною при виборі значення  $\alpha_i$  якомога меншим.

Так як  $G(s)$  не має нулів у правій півплощині і поводить як система першого порядку отримуємо:

$$C(s) = G_M^{-1}(s)L(s), \quad (13)$$

де всі діагональні елементи можуть бути обрані рівними,

$$L(s) = \frac{\alpha}{s + \alpha} I, \quad (14)$$

де  $I$  – це одинична матриця.

У цьому і є перевага використання ІМС контролера. Налаштування ПІ-регулятора зводиться до вибору одного параметра  $\alpha$  – бажаної смуги пропускання замкнутої системи.

Для системи першого порядку час наростання  $t_r$  пов'язано з  $\alpha$  співвідношенням:

$$t_r = \frac{\ln 9}{\alpha}. \quad (15)$$

Особливість часу наростання в тому, що вона відразу ж дає потрібну ширину смуги пропускання. Отже, передавальна функція регулятора з моделлю об'єкта у загальному випадку матиме вигляд:

$$F(s) = [I - C(s)\hat{G}(s)]^{-1}C(s). \quad (16)$$

Вважаючи  $\hat{G} = G$  отримуємо:

$$F(s) = [I - \frac{\alpha}{s + \alpha}I]^{-1}G^{-1}(s)\frac{\alpha}{s + \alpha} = \frac{\alpha}{s}G^{-1}(s) = \frac{\alpha}{s} \begin{bmatrix} sL + (R + r_{on}) & -\omega L \\ \omega L & sL + (R + r_{on}) \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} L(1 + \frac{R + r_{on}}{sL}) & -\frac{\omega L}{s} \\ \frac{\omega L}{s} & L(1 + \frac{R + r_{on}}{sL}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Далі необхідно позбутися поперечного зв'язку (cross-coupling). ІМС регулятор з усуненням поперечного зв'язку показаний на рис. 8.

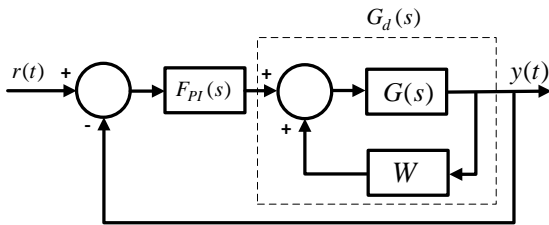


Рисунок 8 – ІМС регулятор з усуненням поперечним зв'язком

На рис. 9 представлена імплементація блоку ІМС регулятора з усуненням взаємозв'язків (decoupling) в програмному комплексі PSCAD.

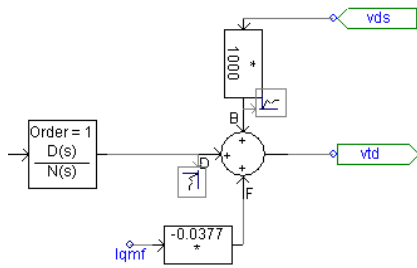


Рисунок 9 – Реалізація decoupling в PSCAD

Далі, замінивши:

$$K_d = \alpha L; K_q = \alpha L; \quad T_{id} = \frac{L}{R + r_{on}}; T_{iq} = \frac{L}{R + r_{on}}. \quad (18)$$

В кінцевому випадку отримуємо:

$$F_{PI}(s) = \begin{bmatrix} K_d(1 + \frac{1}{sT_i}) & 0 \\ 0 & K_q(1 + \frac{1}{sT_i}) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

**Розрахунок параметрів регулятора.** Використовуючи наведені раніше рівняння розраховуємо параметри регуляторів:

$$L = 10^{-4} \text{Гн}, \\ R + r_{on} = 10^{-4} \text{Ом}, \\ t_r = 10^{-2} \text{с}, \\ \alpha = \frac{\ln 9}{t_r} = \frac{2,2}{10^{-2}} = 220, \\ K_p = \alpha \cdot L = 220 \cdot 10^{-4} = 0,22, \\ K_i = \frac{1}{T_i} = \frac{R + r_{on}}{L} = \frac{10^{-4}}{10^{-4}} = 1.$$

Налаштовуємо розроблений ПІ-регулятор в програмному комплексі в PSCAD [10] за допомогою отриманих параметрів рис. 10.

Провівши моделювання схеми, отримуємо реакції на збурення, які зображені на рис. 11.

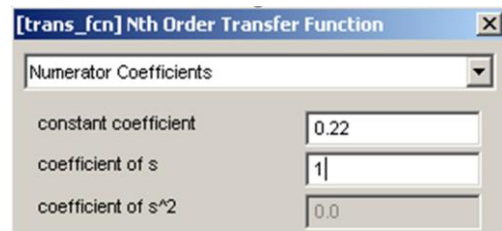


Рисунок 10 – Налаштування ПІ регулятора в PSCAD

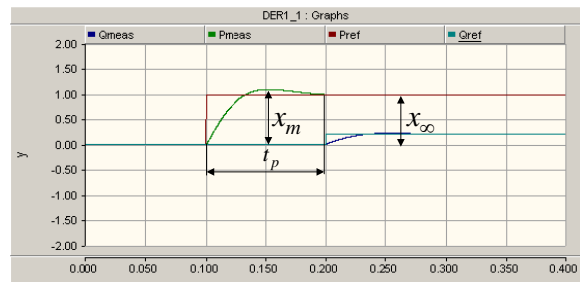


Рисунок 11 – Реакція системи на збурення

Перехідний процес на рис. 11 характеризується трьома показниками: величина максимального перерегулювання  $\sigma_{max}$ , тривалість регулювання  $t_p$ , число коливань регульованої величини протягом часу перехідного процесу  $N_p$ . Для нашого випадку:

$$\sigma = \frac{x_m - x_{\infty}}{x_{\infty}} = \frac{1.12 - 1}{1} = 12\% \\ t_p = 0.095 \text{ с} \\ N_p = 1.$$

За результатами цих показників робимо висновок, що цей перехідний процес відображає коливальний процес, що характеризується одним перерегулюванням з амплітудою 12 % зони, що є достатньо непоганим значенням.

**Висновки.** В роботі розглянута інформаційна модель управління розподіленими джерелами живлення. Запропонована тривірнева система управління. Для безпосереднього управління

інвертором запропоновано застосувати метод внутрішньої моделі та виконаний розрахунок кола керування. Для аналізу результатів роботи була створена модель в програмі PSCAD та побудовані основні характеристики перехідного процесу.

В наступних дослідженнях потрібно розробити підхід для побудови моделі управління на кожному рівні. Ці моделі повинні враховувати не тільки поточні параметри, такі як струм, напруга опір, але й параметри мережі (частота і напруга) і параметри енергоринку, а саме оптимальний потік потужності та вартість носія електроенергії.

### Список літератури

1. Carley S. Distributed generation: An empirical analysis of primary motivators. *Energy Policy*. 2009. Vol. 37, no. 5. P. 1648–1659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.01.003>.
2. An Approach for Cost-Efficient Grid Integration of Distributed Renewable Energy Sources / T. Luhmann et al. *Engineering*. 2015. Vol. 1, no. 4. P. 447–452. DOI: <https://doi.org/10.15302/j-eng-2015099>.
3. Control of Parallel-Connected Power Converters for Low-Voltage Microgrid—Part I: A Hybrid Control Architecture / X. Yu et al. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 25, no. 12. P. 2962–2970. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpe.2010.2087393>.
4. Yazdani A. Control of an islanded Distributed Energy Resource unit with load compensating feed-forward. *Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, PA, USA, 20–24 July 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/pes.2008.4595978>.
5. Barbosa Rolim L. G., Rodrigues da Costa D., Aredes M. Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing PLL Circuit Based on the pq Theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. Vol. 53, no. 6. P. 1919–1926. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2006.885483>.
6. Choi J.-W., Sul S.-K. New current control concept—minimum time current control in the three-phase PWM converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1997. Vol. 12, no. 1. P. 124–131. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.554177>.
7. Microgrids / N. Hatziaargyriou et al. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2007. Vol. 5, no. 4. P. 78–94. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpae.2007.376583>.

9. Control of Power Converters in AC Microgrids / J. Rocabert et al. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27, no. 11. P. 4734–4749. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpe.2012.2199334>.
10. PSCAD User's Guide v4.6. PSCAD. URL: <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/160>.

### References

1. S. Carley, “Distributed generation: An empirical analysis of primary motivators”, *Energy Policy*, vol. 37, no. 5, pp. 1648–1659, May 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.01.003>
2. G. Allan, I. Eromenko, M. Gilmartin, I. Kockar, and P. McGregor, “The economics of distributed energy generation: A literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 543–556, Feb. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.064>
3. T. Luhmann, E. Wieben, R. Treydel, M. Stadler, and T. Kumm, “An approach for cost-efficient grid integration of distributed renewable energy sources”, *Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 447–452, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.15302/j-eng-2015099>
4. X. Yu, A. M. Khambadkone, H. Wang, and S. T. S. Terence, “Control of parallel-connected power converters for low-voltage microgrid—part I: A hybrid control architecture”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 2962–2970, Dec. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/tpe.2010.2087393>
5. A. Yazdani, “Control of an islanded Distributed Energy Resource unit with load compensating feed-forward”, in *Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, PA, USA, Jul. 20–24, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/pes.2008.4595978>
6. L. G. Barbosa Rolim, D. Rodrigues da Costa, and M. Aredes, “Analysis and software implementation of a robust synchronizing PLL circuit based on the pq theory”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 6, pp. 1919–1926, Dec. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/tie.2006.885483>
7. J.-W. Choi and S.-K. Sul, “New current control concept—minimum time current control in the three-phase PWM converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 124–131, Jan. 1997, doi: <https://doi.org/10.1109/63.554177>
8. N. Hatziaargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, “Microgrids”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, Jul. 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/mpae.2007.376583>
9. J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, “Control of power converters in AC microgrids”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/tpe.2012.2199334>
10. “PSCAD user's guide v4.6.” PSCAD. [Online]. Available: <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/160>

Надійшла (received) 15.05.2024

### Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

**Ноздренков Валерій Станіславович (Nozdrenkov Valerii Stanislavovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Codeminders/Tristero Consulting, інженер-програміст; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: [valerii.nozdrenkov@gmail.com](mailto:valerii.nozdrenkov@gmail.com).

**Петровський Михайло Васильович (Petrovskiy Mykhailo Vasylovych)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3136>; e-mail: [m.petrovskiy@etech.sumdu.edu.ua](mailto:m.petrovskiy@etech.sumdu.edu.ua).

**Волохін Віталій Васильович (Volokhin Vitalii Vasylovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, доцент кафедри комп'ютерної інженерії; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8000-3193>; e-mail: [v.volokhin@etech.sumdu.edu.ua](mailto:v.volokhin@etech.sumdu.edu.ua).

**Павлов Андрій Володимирович (Pavlov Andrii Volodymyrovych)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8861-8472>; e-mail: [a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua](mailto:a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua).