

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМНОГО СТАБІЛІЗАТОРА ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ДЕМПФУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Розглянуто питання дослідження низькочастотних коливань потужності та їх вплив на режим роботи енергосистеми. Проведено моделювання режимів роботи енергосистеми на тестовій чотирирохмашинній схемі з використанням програмного забезпечення PowerFactory. Виконано пошук оптимальних параметрів налаштування системного стабілізатора з використанням сучасних методів оптимізації для ефективного демпфування низькочастотних коливань.

Ключові слова: низькочастотні коливання, оптимізація параметрів, моделювання, режими роботи енергосистеми, системний стабілізатор.

Вступ

За останні роки в Україні модернізовано 28 блоків ТЕС, для участі у первинному регулюванні. Для ефективного керування режимами роботи енергосистеми та для підтримання заданої якості електроенергії на синхронних генераторах застосовуються регулятори збудження з системними стабілізаторами (PSS — Power System Stabilizer). Застосування системних стабілізаторів дозволяє демпфувати низькочастотні коливання потужності (НЧК) та нормалізувати режим роботи всієї енергосистеми [1, 2]. На сьогодні існує проблема оптимального налаштування системного стабілізатора з метою демпфування низькочастотних коливань в енергосистемі.

Метою роботи є розроблення алгоритму оптимізації параметрів системного регулятора з використанням методу Particle Swarm Optimization з метою ефективного демпфування низькочастотних коливань потужності в енергосистемі.

Результати дослідження

Енергосистема може бути описана диференціальним рівнянням високого порядку або системою диференціальних рівнянь першого порядку. Для розрахунку перехідних процесів система диференціальних рівнянь у формі змінних стану має вигляд

$$\dot{X} = f(X, U), \quad (1)$$

де X — вектор змінних стану, U — вектор вхідних змінних.

У випадку використання PSS в системах збудження генераторів використовують лінеаризовані моделі [3]. Система рівнянь змінних стану для N машинної схеми з N_{PSS} регуляторами PSS має вигляд

$$\Delta \dot{X} = A \cdot \Delta X + B \cdot U, \quad (2)$$

де A — це матриця $\frac{\partial f}{\partial X}$ розмірністю $4N \times 4N$, B — матриця $\frac{\partial f}{\partial U}$ розмірністю $4N \times N_{PSS}$ (матриці A і B розраховуються в заданій точці), ΔX — вектор стану розмірністю $4N \times 1$, U — вектор вхідних даних $N_{PSS} \times 1$.

Рівняння для демпфувального контролера PSS у формі передаточної функції має вигляд

$$U_{PSS} = K \frac{s}{1 + sT_w} \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \Delta w, \tag{3}$$

де K — коефіцієнт підсилення стабілізатора, T_w — постійна часу вхідного фільтра стабілізатора, T_1, T_3 — постійні часу форсувальних ланок першого порядку, T_2, T_4 — постійні часу затримки аперіодичних ланок першого порядку, Δw — зміна швидкості обертання ротора генератора, U_{PSS} — напруга системного стабілізатора.

Для оптимізації параметрів налаштування системного стабілізатора існує низка методів. У цій роботі пропонується використати метод PSO (Particle Swarm Optimization) — один з багатьох методів категорії Swarm, [4]. Суть методу полягає в тому, що пошук глобального екстремуму цільової функції виконується за допомогою системи (рою), яка складається з n часток (параметрів). Основою методу є популяція, в яких кожен параметр називається часткою і є варіантом розв’язку. Кожний параметр через простір розв’язку прямує до найоптимальнішого значення з певною швидкістю, яка динамічно змінюється в залежності від критерію оптимізації як самої частки, так і інших в цілому. У разі переміщення параметрів в просторі пошуку кращий варіант запам’ятовується. Оптимальне рішення для кожної частки приймається за H_{OPT} , а глобальний оптимум за M_{OPT} . Слід зазначити, що нове значення швидкості та позиції кожної частки розраховуються з урахуванням поточної швидкості та відстані від H_{OPT} до M_{OPT}

$$\begin{aligned} v_{j,g}^{(t+1)} &= v_{j,g}^{(t)} + \mu_1 \cdot (H_{OPT,j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + \mu_2 \cdot (M_{OPT,g} - x_{j,g}^{(t)}); \\ x_{j,g}^{(t+1)} &= x_{j,g}^{(t)} + \mu_3 \cdot v_{j,g}^{(t+1)}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad g = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \tag{4}$$

де n — кількість часток, m — кількість складових вектора v_j та x_j , t — номер ітерації, $v_{j,g}^{(t+1)}$ — швидкість частки j на t ітерації, $x_{j,g}^{(t+1)}$ — координата частки, μ_3 — одиниця вимірювання швидкості (наприклад, $\mu_3 = 1$ тривалість одного такту роботи алгоритму), μ_1, μ_2, μ_3 — коефіцієнти, які вибираються випадковим чином з діапазону $[0,1]$, $H_{OPT,j,g}$ — оптимальний коефіцієнт частки, $M_{OPT,g}$ — загальний оптимум всіх часток.

Виходячи з вищевикладеного, сформуємо цільову функцію

$$\Phi = \sum_{jw \neq 0} |\sigma_{OPT} - \sigma_i|, \tag{5}$$

де $\sigma_{OPT} = f(\omega, \xi)$ [5]; ξ — коефіцієнт демпфування коливань потужності, σ_i — дійсна частина; ω_i — уявна частина моди $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$, яка є складовою вектора власних чисел розв’язку системи рівнянь (2).

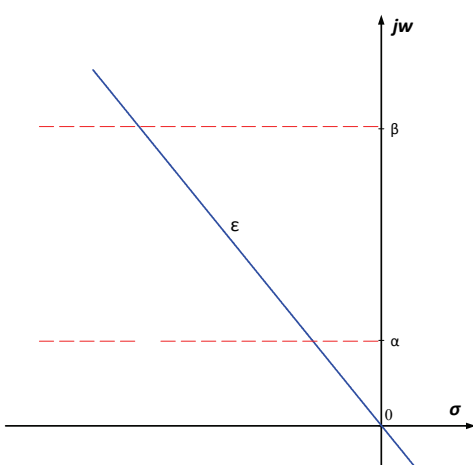


Рис. 1. Графічне представлення обмежень

Тобто $\lambda_i = f(T_1 \dots T_{4 \times N_{PSS}}, K_1 \dots K_{N_{PSS}}, \bar{L}_i)$,

де $T_1 \dots T_{4 \times N_{PSS}}, K_1 \dots K_{N_{PSS}}$ — параметри налаштування системних стабілізаторів PSS генераторів, \bar{L}_i — вектор інших параметрів електричної мережі.

Цільова функція (5) має такі обмеження у вигляді системи нерівностей:

$$\begin{cases} \sigma < 0; \\ \xi_i \geq \xi_{\min}; \\ \alpha < \sigma_k < \beta, \end{cases} \tag{6}$$

де ξ_{\min} — мінімальний коефіцієнт демпфування, α, β — вибраний діапазон низькочастотних коливань.

Як частки в цьому методі оптимізації виступає множина мод λ_i на комплексній площині з обмеженнями згідно з

(6) (рис. 1). Оптимальне налаштування параметрів відповідає дотриманню умов, що відповідають мінімуму цільової функції (5) із заданим коефіцієнтом демпфування ϵ .

Для досліджень вибрано тестову схему електричної мережі (рис. 2), яка складається з 11 вузлів, 8 ЛЕП та чотирьох синхронних генераторів, які під'єднані через підвищувальні трансформатори, а також навантажень, встановлених у вузлах 7 та 9.

На кожному генераторі може бути встановлений системний стабілізатор (PSS), структура якого подана на рис. 3, а параметри налаштування зведені в табл. 1.

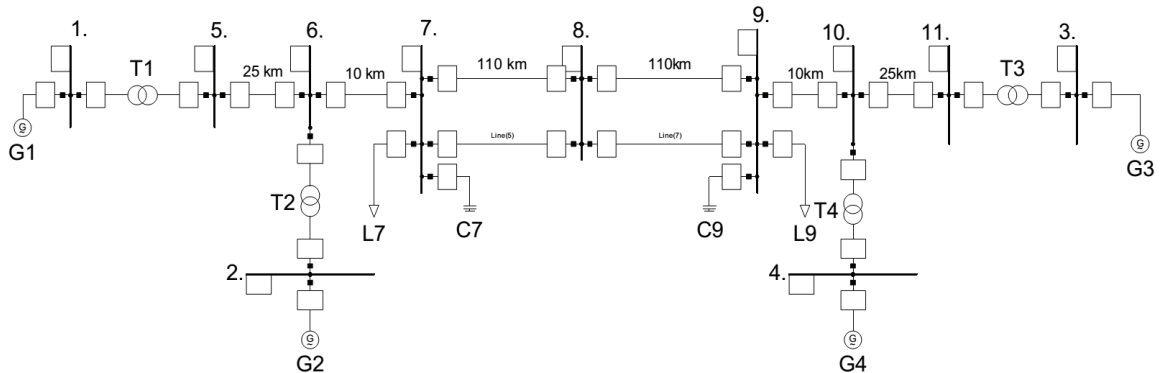


Рис. 2. Тестова схема електричної мережі

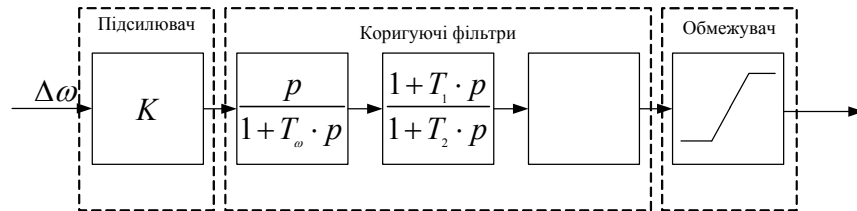


Рис. 3. Структурна схема системного регулятора (PSS)

Початкові параметри налаштування PSS генераторів

K	T_1	T_2	T_3	T_4	T_w
30,36	2,40	1,56	1,55	2,19	10,00

Таблиця 1

Аналіз результатів моделювання режиму роботи тової електричної мережі без PSS з використанням програмного забезпечення DigSilent PowerFactory за виникнення КЗ загальною тривалістю 0,2 с на лінії 7—8 на першій секунді показав, що після усунення КЗ, в ЛЕП 7—8 спостерігаються слабодемпфовані низькочастотні коливання активної потужності (рис. 4, характеристика 1). Використання методу швидкого перетворення Фур'є дозволило встановити домінуючу частоту коливань, яка становить 0,62 Гц.

Встановлення на генераторах PSS з довільними параметрами налаштування дозволило збільшити демпфування міжсистемних коливань потужності (рис. 4, характеристика 2), але модальний аналіз показав недостатній показник демпфування, який менший $\epsilon < 5\%$. [5].

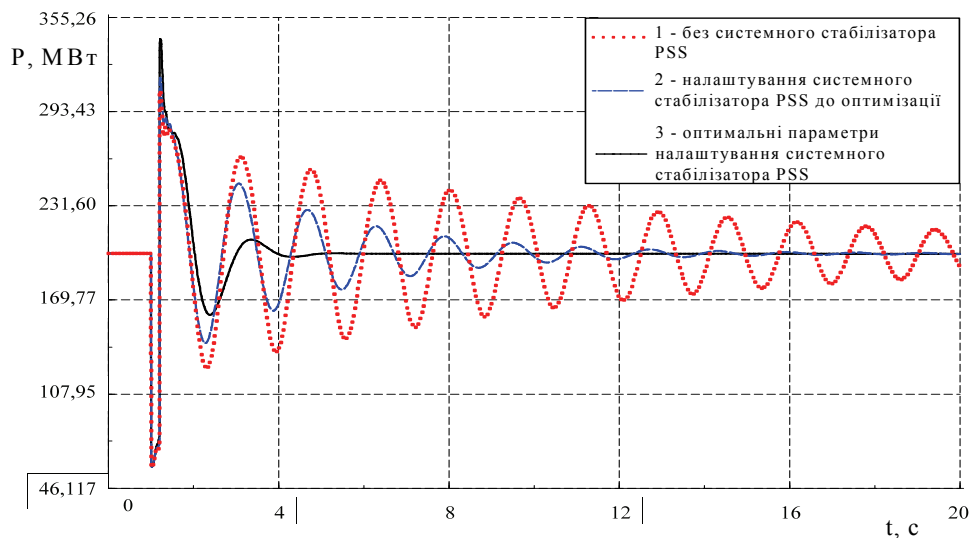


Рис. 4. Графік зміни активної потужності в лінії 7—8 без PSS та із застосуванням PSS

Таблиця 2

**Результати оптимізації параметрів налаштувань
PSS генераторів з використанням методу PSO**

Параметри налаштування PSS	K	T_1	T_2	T_3	T_4
Г1	31,374	2,478	1,444	1,593	2,453
Г2	35,728	2,792	0,2	0,825	1,161
Г3	45,269	1,233	1,367	1,748	0,717
Г4	39,058	1,918	0,809	1,504	0,354

Використання алгоритму оптимізації PSO дозволило знайти оптимальні параметри налаштування PSS (табл. 2), які відповідають вимогам цільової функції та забезпечують демпфування більше 5% (рис. 4, характеристика 3).

Висновки

В результаті проведених досліджень запропоновано використання методу PSO з метою оптимізації параметрів налаштування PSS генераторів, які, забезпечуючи ефективне демпфування низькочастотних коливань потужності на агрегатному рівні, зменшують міжсистемні коливання в електричній мережі. Використання цього методу показало його ефективність для багатомашинних систем. Отримані результати дозволяють використати розроблений підхід для демпфування низькочастотних коливань потужності в енергосистемах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Xiaorui CHU. Analysis of Low frequency Oscillation in Power System // Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013). — 2013. — P. 2105—2108.
2. Яндутьський О. С. Дослідження властивостей низькочастотних коливань на основі синхронізованих векторних вимірів / О. С. Яндутьський, А. А. Марченко, В. В. Мацейко // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 5. — С. 74—76.
3. Paland B. Robust Control in Power Systems / B. Paland, B. Chaudhuri. — Springer Inc. New York, 2005.
4. Saumya K. Gautam. Improved particle swarm optimization based load frequency control in a single area power system / Saumya K. Gautam, Nakul Goyal // Annual IEEE India Conference (INDICON). — Kolkata, 2010. — P. 17—19.
5. Kundur P. Power system stability and control / Kundur P., Balu N. J., Lauby M. G. — New York, London : McGraw-Hill, 1994. — P. 1200.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2017

Яндутьський Олександр Станіславович — д-р. техн. наук, професор, декан факультету електроенерго-техніки та автоматики, e-mail: yandu_kpi@ukr.net ;

Марченко Анатолій Андрійович — канд. техн. наук, доцент, в. о. завідувача кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: marchenko_ae@ukr.net ;

Гулий Володимир Сергійович — аспірант кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

O. S. Yandulskyi¹
A. A. Marchenko¹
V. S. Hulyi¹

Optimization of System Stabilizer Parameters for Efficient Damping of Low Frequencies in the Power System

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

There have been considered the issues of the investigation of low frequency power oscillations and their influence on the power system operation modes. The simulation of the power system operating modes has been performed in the

4-machine test power system using the Power Factory software. The search for the optimal parameters of the system stabilizer setting has been made using modern methods of optimization for effective damping of low frequency oscillations.

Keywords: low-frequency oscillations, optimization of parameters, simulation, power system operation modes, system stabilizer.

Yandulskiy Oleksandr S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Dean of the Department of Electric Power Engineering and Automation, e-mail: yandu_kpi@ukr.net ;

Marchenko Anatolii A. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Acting Head of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: marchenko_ae@ukr.net ;

Hulyi Volodymyr S. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net

А. С. Яндульский¹

А. А. Марченко¹

В. С. Гулый¹

Оптимизация параметров системного стабилизатора для эффективного демпфирования низкочастотных колебаний в энергосистеме Украины

¹Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Рассмотрен вопрос исследования низкочастотных колебаний мощности и их влияние на режим работы энергосистемы. Произведено моделирование режимов работы энергосистемы на тестовой четырехмашинной схеме с использованием программного обеспечения PowerFactory. Выполнен поиск оптимальных параметров настройки системного стабилизатора с использованием современных методов оптимизации для эффективного демпфирования низкочастотных колебаний.

Ключевые слова: низкочастотные колебания, оптимизация параметров, моделирование, режимы работы энергосистемы, системный стабилизатор.

Яндульский Александр Станиславович — д-р. техн. наук, профессор, декан факультета электроэнергетики и автоматики, e-mail: yandu_kpi@ukr.net ;

Марченко Анатолий Андреевич — канд. техн. наук, доцент, в.о. заведующего кафедры автоматизации энергосистем, e-mail: marchenko_ae@ukr.net ;

Гулый Владимир Сергеевич — аспирант кафедры автоматизации энергосистем, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net