

СИСТЕМНИЙ СТАБІЛІЗАТОР ПОТУЖНОСТІ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Марченко А.А., к.т.н., доцент, Лютер А.О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. В епоху стрімкого технологічного прогресу та зростаючих вимог до надійності енергетичних систем, питання стійкості та неперервності постачання електроенергії набуває надзвичайної важливості. Стабільність в електромережах стає основою для забезпечення ефективності та безперебійності життєво важливих процесів та технологій.

В цьому контексті, використання системних стабілізаторів потужності виявляється критично важливим для збереження стійкості та нормальної експлуатації енергетичних систем, дозволяючи підтримувати оптимальний рівень потужності, компенсувати зміни у споживанні та виробництві електроенергії [1].

Мета роботи. Метою статті є дослідження та опис стабілізаторів потужності в якості ключового засобу для підвищення стабільності та якості електропостачання. Стаття спрямована на вивчення принципів функціонування, огляд основних використовуваних типів та методів налаштування системних стабілізаторів потужності у забезпеченні стійкості електросистем.

Матеріали та результати досліджень. Більшість країн світу для автоматичного керування режимами роботи синхронних машин (СМ) в складі електроенергетичних систем (ЕЕС) використовують системи автоматичного регулювання збудження синхронних генераторів (САРЗ СГ). Ці системи включають в себе два відмінні пристрої, кожен з яких відповідає за реалізацію двох ключових функцій:

1) Автоматичний регулятор напруги (AVR), який забезпечує підтримання стабільного рівня напруги на статорі синхронного генератора.

2) Системний стабілізатор потужності – Power System Stabilizer (PSS), головним завданням якого є демпфування електромеханічних коливань в енергосистемі.

На рис. 1 зображена загальна блок-схема системи автоматичного управління збудження синхронної машини, до складу якої входить системний стабілізатор потужності [2].

Позначення відповідних сигналів на схемі:

V_{REF} – задане значення напруги генератора; V_{OEL} – сигнал від обмежувача перевантаження по струму ротора або статора при форсуванні збудження; V_{UEL} – сигнал від обмежувача мінімального збудження (ОМЗ); V_{IN} – сигнали від внутрішніх обмежувачів і захистів системи збудження (обмеження кратності напруги збудження при форсуванні, обмежувачі системи охолодження тиристорного перетворювача, релейний захист і автоматика (РЗА) системи збудження і т. д.); V_s – напруга на виході стабілізатора; f , ω , P_a – відповідно, частота, кутова швидкість та потужність на виході з генератора; V_f – вихідна

напруга з перетворювачів; V_t – вихідна напруга генератора; I_t – вихідний струм генератора; V_c – сигнал з перетворювачів.

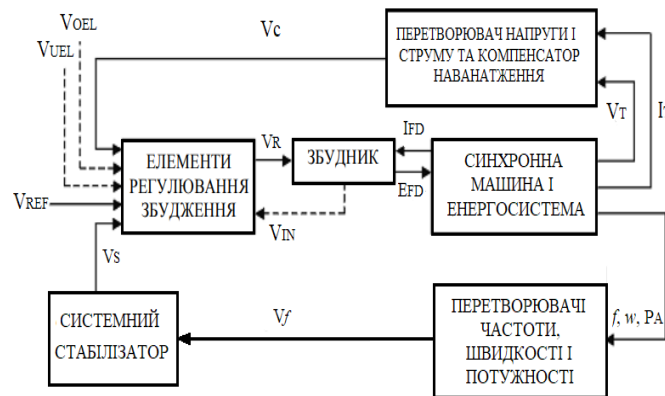


Рисунок 1 – Загальна функціональна блок-схема САРЗ СГ з системним стабілізатором

Головними складовими схеми є два контури зворотного зв'язку, які виконують дві головні вищезгадані функції:

Верхній контур – регулювання та підтримання рівня напруги на обмотках статора генератора;

Нижній контур – демпфування електромеханічних коливань в системі за рахунок використання системного стабілізатора.

Головним завданням PSS є створення додаткового коригувального сигналу в САРЗ СГ, який дозволяє оперативно реагувати системі на виникнення відхилень потужності в системі, здебільшого низькочастотних [3].

Вхідними сигналами системного стабілізатора PSS (Рис. 1) можуть бути відхилення кутової швидкості обертання ротора ($\Delta\omega$), відхилення частоти мережі (Δf) або різниця між механічною потужністю турбіни і електромагнітною потужністю, яка видається генератором.

Використовувані в сучасних системах PSS поділяються на дві групи: Conventional PSS (звичайний односмуговий стабілізатор) і Multiband PSS (широкосмуговий стабілізатор). Вони розрізняються як вхідними сигналами, так і структурою. Інші основні використовувані типи PSS будуть розглянуті далі.

Стабілізатор на основі швидкості обертання ротора (Speed-based stabilizer).

Один із найпростіших пристроїв. Вхідним сигналом є відхилення швидкості обертання ротора генератора від номінальної ($\Delta\omega_r$). Speed-based PSS складається з підсилювальної ланки, фільтра вищих частот та ланки компенсації запізнення. Структурну схему стабілізатора наведено на рис. 2.

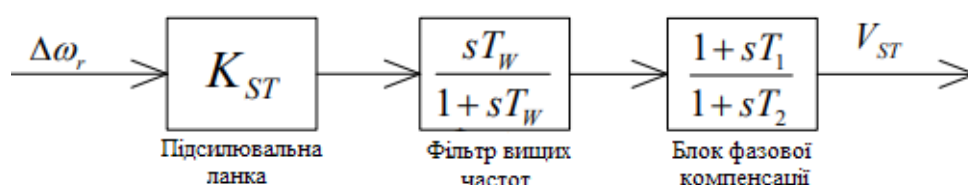


Рисунок 2 – Структурна схема стабілізатора Speed-based PSS

Недоліком такого типу є, що вхідний сигнал швидкості може містити велику кількість перешкод, що може спричинити дестабілізуючий ефекту [3].

Стабілізатор, що працює за відхиленням частоти мережі (Frequency-based stabilizer).

Структура стабілізатора аналогічна до тієї, яку ми розглядали раніше (рис. 2). Замість використання вхідного сигналу про відхилення швидкості обертання ротора, тут використовується відхилення частоти мережі (Δf). Однією з переваг такого стабілізатора на основі частоти мережі є більша чутливість до низькочастотних змін, які відбуваються між різними областями. Але в той же час, він менше схильний фіксувати "гойдання" між генераторами, розташованими поруч. Існує й інший недолік - стабілізатор на основі частоти мережі негативно реагує на значні споживачі електроенергії, які можуть створювати значні перешкоди в локальній електромережі та погіршувати якість електричної енергії в точці підключення до загальної мережі [4]. У такому разі стабілізатор може здійснювати некоректне демпфування коливань.

Стабілізатор, що працює за відхиленням електромагнітної потужності генератора (Power-based stabilizer).

Вхідним сигналом для цього типу стабілізатора є різниця між електромагнітною потужністю генератора та механічною потужністю турбіни.

Потужність і швидкість ротора мають пряму залежність:

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_n}{\omega_{r0}} \cdot \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = P_m - P_e \rightarrow \quad (1)$$

$$\rightarrow \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H} (P_m - P_e)$$

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{J \cdot \omega_{r0}}{S_n} \quad (2)$$

де H – коефіцієнт інерції;

S_n – номінальна потужність генератора, в.о.;

ω_{r0} – номінальна синхронна швидкість обертання ротора генератора, в.о.;

ω_r – фактична кутова швидкість обертання ротора;

J – момент інерції;

P_m – механічна потужність турбіни;

P_e – електромагнітна потужність, що видається генератором.

Вимірювання електромагнітної потужності є відносно простим завданням, тоді як визначення механічної потужності є складнішим. Тому в більшості випадків для стабілізаторів цього типу використовується постійна механічна потужність. Однак, недоліком також є те, що PSS покращує демпфування лише одного типу коливань, і будь-які зміни у механічній потужності турбіни можуть спотворити вхідний сигнал. Це вимагає використання "жорсткого" обмежувача, що може негативно вплинути на ефективність роботи стабілізатора [5].

Інтегральний стабілізатор на основі прискорення потужності (Integral of accelerating power-based stabilizer).

Розглянуті вище стабілізатори також мають спільний недолік – вони сильно реагують на бічні та обертові рухи ротора та турбіни. Для усунення цього ефекту використовується Integral of accelerating power-based PSS, який зображений на рис. 3. У цьому стабілізаторі використовуються два вхідні сигнали, які обробляються різними каналами. Перший вхідний сигнал (VS1) може бути відхиленням частоти обертання ротора ($\Delta\omega$) або відхиленням частоти мережі (Δf), а другий сигнал (VS2) - електромагнітною потужністю (P_e) [4].

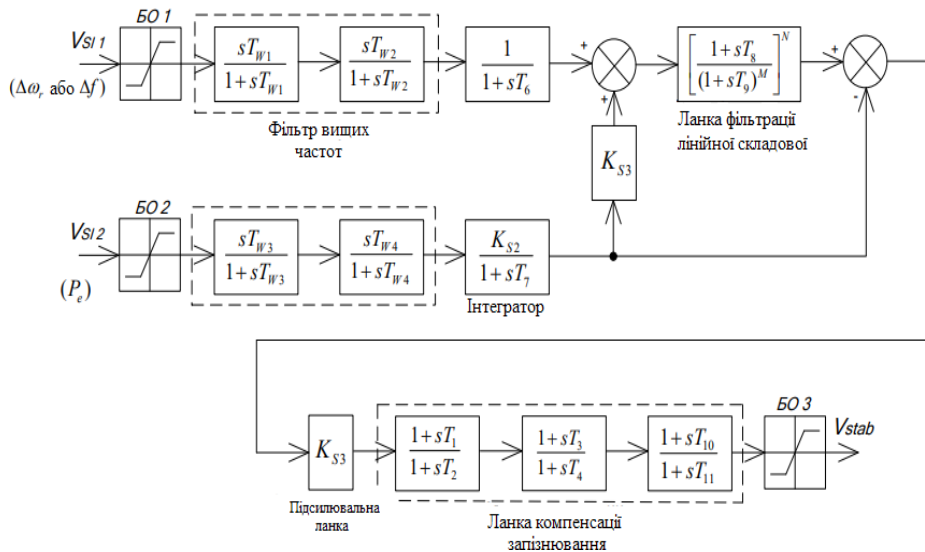


Рисунок 3 – Структура інтегрального стабілізатора на основі прискорення потужності

Широкосмуговий стабілізатор (Multiband stabilizer).

Даний тип стабілізатора є відповіддю на труднощі налаштування односмугових стабілізаторів, оскільки компенсуючі елементи, спрямовані на відставання запізнення, не можуть точно компенсувати широкий спектр низькочастотних коливань. Якщо мережа демонструє як локальні, так і міжсистемні коливання, налаштування стабілізаторів ускладнюється, і досягнення оптимального демпфування стає проблематичним або навіть неможливим завданням. Структура Multiband stabilizer показана на рис. 4.

Наведена система має три канали: низькочастотний, середньочастотний та високочастотний. Кожен канал налаштовується окремо, надаючи більшу гнучкість у роботі. Налаштування параметрів, таких як постійні часу диференційних фільтрів та коефіцієнти підсилення, виявляється достатньо простим та описано у [3]. Система використовує два вхідні сигнали, аналогічні до інтегрального PSS, але вони проходять через вимірювальний фільтр, який визначає локальні, міжстанційні та групові коливання потужності.

Для налаштування стабілізаторів застосовуються методи, які ґрунтуються на принципі фазової компенсації, методи годографа коренів (Root Locus) та чисельне моделювання. Визначення параметрів регулятора PSS має дві основні мети. З одного боку, обрані параметри повинні забезпечувати необхідний рівень

стійкості і демпфування електромеханічних коливань, що має велике значення для систем із слабкими зв'язками. З іншого боку, обрані налаштування повинні бути робастними, тобто відповідати вимогам для широкого спектру можливих режимів роботи генератора.

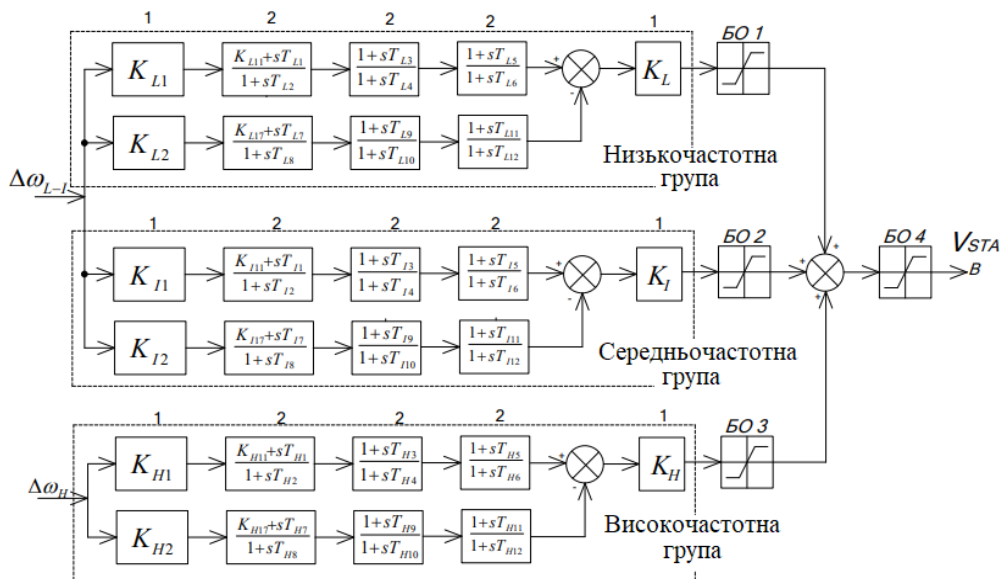


Рисунок 4 – Структурна схема стабілізатора Multiband stabilizer

Для демпфування коливань пристрій PSS має створювати відповідну складову електричного моменту на роторі генератора, яка має відповідати за фазу відхилення швидкості обертання. Оптимальна реалізація цієї умови залежить від регулювання окремого пристрою. При будь-яких вхідних параметрах передавальна функція пристрою PSS повинна забезпечувати фазову компенсацію амплітудно-частотної (АЧХ) та фазо-частотної (ФЧХ) характеристики системи збудження, генератора і енергосистеми.

Система збудження, генератор і енергосистема разом визначають передавальну функцію, що пов'язує вплив пристрою PSS і складової електричного моменту. Це дозволяє визначити зміну швидкості обертання ротора та інші параметри режиму, які є вхідними параметрами PSS, що в свою чергу допомагає визначити фазовий зсув, який слід компенсувати за допомогою вибору налаштувань. Найбільш складним режимом для роботи системного стабілізатора є режим максимального навантаження, тому його необхідно розглядати в першу чергу. Режим роботи електричної мережі також впливає на стійкість і, відповідно, на вибір параметрів регулятора.

Параметри фазово-компенсуючих ланок регулятора вибираються з метою компенсації фазового зсуву між впливом регулятора та сигналом електричного моменту. При цьому фазовий зсув системи повинен бути близьким до нуля у діапазоні частот, що відповідає електромеханічним коливанням, зокрема в діапазоні від 0,1 до 3 Гц. Це допомагає ефективно приглушувати вказані коливання за допомогою електричного моменту [6].

Наступним методом налаштування є обирання коефіцієнтів підсилення пристрою PSS на основі годографа коренів, який вказує на розташування коренів

системи на комплексній площині. Мета полягає у виборі коефіцієнта підсилення для найбільшого зміщення полюсів системи вліво. При ідеальній фазовій компенсації збільшення коефіцієнта підсилення PSS призводить до пропорційного збільшення приглушення регулятора для власних коливань генератора. Однак при неповній компенсації зміщення полюсів призводять до зміни не лише дійсної, а й уявної частини, що може призвести до збільшення частоти відповідних мод.

Останні методом визначення параметрів пристрою PSS є чисельне моделювання нелінійної системи рівнянь, яка описує енергосистему для обраних налаштувань регулятора. Мета моделювання полягає у перевірці працездатності регулятора при різних збуреннях, таких як короткі замикання та поступова зміна встановленого значення регулятора збудження за напругою.

Висновки: Аналізуючи інформацію про принципи роботи, задачі, типи, методи налаштувань системних стабілізаторів потужності та стан сучасних електроенергетичних мереж і їх стійкості, показують необхідність застосування PSS в сучасних системах автоматичного регулювання збудження синхронних генераторів, задля ефективного демпфування низькочастотних електромеханічних коливань, що виникають в процесі експлуатації енергосистем.

Наведені основні типи використовуваних в сучасних САПЗ СГ системних стабілізаторів. Кожен з описаних типів стабілізаторів має як свої переваги, так і недоліки, а також відповідну специфіку роботи та налаштування параметрів, що необхідно враховувати в процесі проектування систем регулювання збудження синхронних генераторів з використанням PSS.

В свою чергу, методи налаштування параметрів стабілізаторів потребують комплексного підходу, який дозволить оперативно реагувати та ефективно зменшувати вплив низькочастотних електромеханічних коливань в енергосистемах.

Підсумовуючи, можемо стверджувати, що наведені дані можуть бути використані для розробки та налаштувань параметрів нових ефективних системних стабілізаторів потужності.

Перелік посилань

1. Яндутьський О. С., Марченко А. А., Гулий В. С. Оптимізація параметрів системного стабілізатора для ефективного демпфування низькочастотних коливань в енергосистемі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 6: 100-104. – 2017.
2. Report, IEEE Committee. "Excitation system models for power system stability studies." *IEEE Transactions on power apparatus and systems* 2 (1981): 494-509.
3. Larsen, E. V., and D. A. Swann. "Applying power system stabilizers part I: general concepts." *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems* 6.1981.: 3017-3024.
4. Kundur P.S. Power System Stability and Control // McGraw-Hill Professional. – 1994. – 1176 p.
5. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Power Engineering Society in IEEE Std 421.5-2005, 2006, pp. 1-85.
6. "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," in *IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992)*, vol., no., pp.1-93, 21 April 2006, doi: 10.1109/IEEESTD.2006.99499.