

# ТЕХНОЛОГІЇ TECHNIQUE

УДК 621.311

О.С. Яндульський, д-р техн. наук, професор  
В.В. Мацейко, Д.В. Катрич

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

## ДЕМПФУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ НА ОСНОВІ СИНХРОНІЗОВАНИХ ВИМІРІВ ВІД ПРИСТРОЇВ СМПР

*Розглянуті актуальні питання дослідження низькочастотних коливань (НЧК) потужності в Об'єднаній електроенергетичній системі (ОЕС) України в умовах впровадження сучасних систем моніторингу перехідних режимів (СМПР). Проаналізовані основні методи і засоби зменшення впливу НЧК на режими роботи енергосистем та обґрунтовано доцільність використання синхронізованих вимірів режимних параметрів в якості додаткових вхідних сигналів в засоби демпфування. Для вибору оптимальних місць встановлення пристроїв демпфування, вибору необхідних сигналів та параметрів налаштування контролера демпфування коливань використано метод залишків. Проведено моделювання режимів роботи енергосистеми в програмному середовищі Power Factory для підтвердження ефективності запропонованого підходу.*

**Ключові слова:** низькочастотні коливання, система моніторингу перехідних режимів, демпфування, контролер демпфування коливань.

### Вступ

Аналіз численних аварій в різних електроенергетичних системах (ЕЕС) світу показав, що однією з причин їх виникнення були низькочастотні коливання (НЧК) режимних параметрів, що обумовлює необхідність вирішення комплексу задач по зменшенню їх впливу на режими роботи та підвищення стійкості ЕЕС [1]. Природою виникнення НЧК можуть бути порушення балансу потужності в ЕЕС, зміна топології мережі (вимкнення ліній електропередачі (ЛЕП), експлуатаційні та аварійні комутаційні режими ЕЕС), збурення, викликані короткими замиканнями (к.з.). Крім того, коливання виникають при неправильному налаштуванні різного типу регуляторів, автоматики та компенсуючих конденсаторних пристроїв.

Особливу увагу даному питанню почали приділяти з впровадженням систем моніторингу перехідних режимів (СМПР), які створили нові можливості виявлення НЧК як в режимі off – line, так і в on–line режимі. Це, насамперед, пов'язано з періодом дискретизації даних, з якою здійснюється синхронна реєстрація, та можливістю зазначених систем з високою точністю відображати зміну режимних параметрів [2].

Для ОЕС України, яка характеризується наявністю потужних ЕЕС, пов'язаних між собою відносно слабкими міжсистемними зв'язками, зменшення впливу НЧК на режими роботи є також актуальною задачею. Проведені експериментальні дослідження при використанні синхронізованих вимірів з пристроїв СМПР Регіна-Ч підтвердили появу НЧК потужності в перетинах ОЕС України при виникненні значних збурень в системоутворюючій мережі, в тому числі небезпечних з точки зору порушення коливальної стійкості, що вимагає досліджень по демпфуванню зазначених НЧК [3].

Цілий ряд робіт закордонних та українських фахівців направлений на дослідження основних методів та засобів зменшення впливу НЧК на режими роботи ЕЕС, найбільш ефективними серед яких виділяють модернізацію і переналаштування існуючих автоматичних регуляторів збудження (АРЗ) та застосування в їхньому складі системних стабілізаторів (PSS – power system stabilizer) [4,5]. Також одним з пріоритетних засобів підвищення ефективності роботи найбільших ЕС світу є впровадження у практику їх експлуатації систем гнучкої передачі змінним струмом (ГПЗС). Дані системи дозволяють адаптивно регулювати основні системні параметри передачі змінного струму, і в реальному масштабі часу домагатися найкращих характеристик передачі потужності [6,7].

В той же час, необхідно зазначити, що поодиноким застосування тих чи інших засобів в багатомашинних ЕЕС з різнотипними регуляторами збудження в загальному випадку направлене на демпфування лише окремих коливальних мод. Так, системні стабілізатори PSS, які встановлюються на станційному рівні в складі систем АРЗ можуть ефективно демпфувати локальні моди коливання,

оскільки безпосередньо отримують вхідну величину від генератора, але вони не завжди при цьому можуть бути ефективним засобом демпфування міжсистемних НЧК. Це пов'язано з тим, що міжсистемні моди коливання, які є одними з найбільш небезпечних мають невисоку спостережуваність в локальних сигналах генераторів. Аналіз виявлених низькочастотних коливань перетоків потужності в міждержавних та внутрішніх перетинах ОЕС України в результаті обробки синхронізованих даних з пристроїв СМПП також показав, що міжсистемні електромеханічні НЧК зі значною амплітудою головним чином спостерігаються та ідентифікуються в перетоках активної потужності по міжсистемних ЛЕП високого класу напруги. Подібні коливання також спостерігаються в лініях менших класів напруги, але з незначною амплітудою, що свідчить про високу степінь збереження коливальної стійкості в даних мережах [3].

Таким чином, пристрої демпфування на станційному рівні не мають достатнього впливу на міжсистемні НЧК, що, в свою чергу, може призвести до виникнення аварії. Щоб усунути даний недолік пропонується в пристрої демпфування ввести додаткові канали з вхідними сигналами від пристроїв СМПП, які в основному розміщуються в системоутворюючій мережі ОЕС.

**Мета роботи** полягає в дослідженні шляхів зменшення впливу НЧК на режими роботи енергосистем за рахунок здійснення демпфування локальних та міжсистемних НЧК режимних параметрів при використанні синхронізованих векторних вимірів з пристроїв СМПП в якості додаткових сигналів в засоби демпфування.

### Матеріал і результати досліджень

Забезпечення ефективного демпфування НЧК в ЕЕС вимагає коректних налаштувань систем АРЗ і PSS, а також пристроїв сімейства ГПЗС у відповідності з локальними та міжсистемними модами коливань ЕЕС, для ідентифікації яких широко використовуються методи модального аналізу. Модальний аналіз являє собою процес визначення властивих динамічних характеристик системи шляхом розкладання вільного руху енергосистеми (ЕС) на складові (моди або форми руху) та їх аналіз.

При малих відхиленнях параметрів від стану рівноваги, коливання параметрів режиму ЕС можна представити як лінійну комбінацію  $n$  функцій виду  $e^{\lambda_j t}$ , що відображають  $n$  динамічних модальних складових (мод або форм) руху ЕС, параметри яких визначаються власними значеннями та власними векторами матриці стану  $A$ . Отримані власні числа матриці ЕЕС  $\lambda_j = \delta_j \pm j\omega_j$  дозволяють визначити найбільш небезпечні локальні та міжсистемні моди коливань системи, які, в загальному, відповідають можливим режимам коливань. Дійсна і уявна складові власного значення  $\lambda_j$  матриці стану характеризують відповідно коефіцієнт затухання  $\delta_j$  та власну частоту  $\omega_j$   $j$ -ої моди руху енергосистеми, а комплексні компоненти власних векторів впливають на величини амплітуд та початкових фаз  $j$ -ої складової руху в змінній стану [8].

Демпфування визначених небезпечних мод коливань, в свою чергу, вимагає вибору оптимальних місць встановлення пристроїв демпфування, вибору необхідних сигналів та складових частин (параметрів налаштування) контролера демпфування. Для вирішення поставлених задач в світовій практиці ефективно використовується метод залишків, який базується на лінійній моделі системи, передаточна функція якої  $G(s)$  представляється у вигляді суми залишків:

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i}, \quad (1)$$

де  $n$  власних значень  $\lambda_j$  відповідають  $n$  модам коливань системи, а залишки  $R_i$  окремої моди показують чутливість власного значення даної моди до зворотного зв'язку між входом та виходом системи "один вхід – один вихід".

Крім того, залишки можна представити у вигляді добутку спостережуваності і керованості моди коливання [8]:

$$R_i = C \phi_i \psi_i B \quad (2)$$

Спостережуваність дає можливість визначити ступінь участі певної змінної в даній моді руху, тобто дає інформацію в яких змінних стану найбільше проявлятиметься дана мода коливання та як будуть коливатися відповідні групи генераторів (синфазно, в протифазі). Керованість дає можливість визначити степінь впливу певної змінної на дану моду руху, тобто дає інформацію про те, які генератори найбільшим чином впливають на відповідну моду коливання.

Як показано в [9] використання зворотного зв'язку в системі приводить до зміни власного числа моди коливання, яка визначається наступним чином:

$$\Delta\lambda_i = R_i H(\lambda_i) \quad (3)$$

З рівняння 3 видно, що зсув власного числа пропорційний величині залишку. Зміна власного числа повинна бути направлена в сторону лівої півплощини комплексної площини власних чисел, що забезпечить необхідний коефіцієнт демпфування. Для небезпечних мод розраховуються всі можливі залишки, серед яких визначається максимальний залишок, який свідчить про найбільш ефективне місце встановлення додаткового зворотного зв'язку контролера демпфування. На рис.1 зображено зсув власного числа при використанні контролера демпфування коливань на комплексній площині, де похилою пунктирною лінією обмежена зона небезпечних режимів (праворуч від пунктиру коефіцієнт демпфування менший ніж 5%).

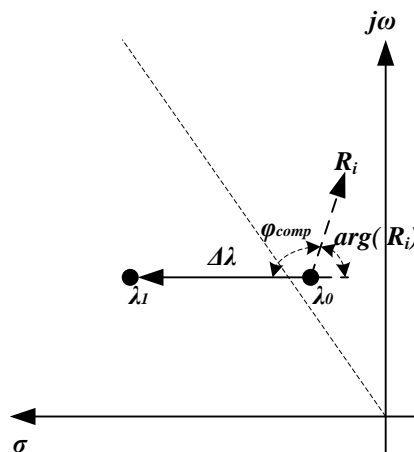


Рис.1 Зсув власного числа при використанні контролера демпфування коливань

Як видно з рис. 1, кут  $\varphi_{comp}$  відображає кут компенсації, який необхідний для переміщення власного числа паралельно осі дійсних значень, що реалізується за допомогою динамічного компенсатора (фазосувної ланки) в контролері демпфування. Параметри налаштування даної складової контролера, а саме постійні часу випередження та запізнення розраховуються як:

$$\begin{aligned} \varphi_{comp} &= 180^\circ - \arg(R_i) \\ a_c &= \frac{T_{lead}}{T_{lag}} = \frac{1 - \sin(\frac{\varphi_{comp}}{m_c})}{1 + \sin(\frac{\varphi_{comp}}{m_c})} \quad (4) \\ T_{lag} &= \frac{1}{\omega_i \sqrt{a_c}} \quad T_{lead} = a_c T_{lag}, \end{aligned}$$

де  $\arg(R_i)$  – фазовий кут залишку,  $\omega_i$  – власна частота моди руху енергосистеми,  $m_c$  – кількість аперіодичних ланок.

В загальному, контролер демпфування низькочастотних коливань включає в себе блок підсилення, іздромний фільтр ( фільтр постійної складової), динамічний компенсатор та обмежувач. Іздромний фільтр необхідний для того, щоб уникнути реакції контролера на зсув постійної складової вхідного сигналу. Динамічний компенсатор складається з двох (або більше) аперіодичних ланок, які в залежності від відношення відповідних постійних часу вносять випередження або запізнення в сигнал. Обмежувач використовується для покращення роботи контролера при великих відхиленнях вхідного сигналу. В загальному передаточна функція даного контуру має вигляд:

$$H(s) = K \frac{sT_w}{1 + sT_w} \left[ \frac{1 + sT_{lead}}{1 + sT_{lag}} \right]^m = K H_1(s), \quad (5)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення;  $H_1(s)$  – передаточна функція блоку стабілізації;  $T_w$  – постійна часу форсування;  $T_{lead}, T_{lag}$  – постійні часу випередження та запізнення відповідно. При цьому коефіцієнт підсилення розраховуються як функція бажаного розташування власного числа в зоні безпечних режимів, де коефіцієнт демпфування становитиме більше 5%:

$$K = \left| \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{R_i H(\lambda_i)} \right| \quad (6)$$

Таким чином, якщо забезпечити в систему регулювання АРЗ і PSS додатковий вхід від пристроїв СМПР сигналу, в якому добре спостерігаються небезпечні міжсистемні коливання та налаштувати відповідний контролер згідно з запропонованим методом можна значно покращити демпфування і локальних, і міжсистемних коливань. Для підтвердження ефективності запропонованого підходу проведено моделювання режимів роботи енергосистеми в програмному середовищі Power Factory на прикладі 4 – х машинної тестової схеми, яка наведена на рис. 1.

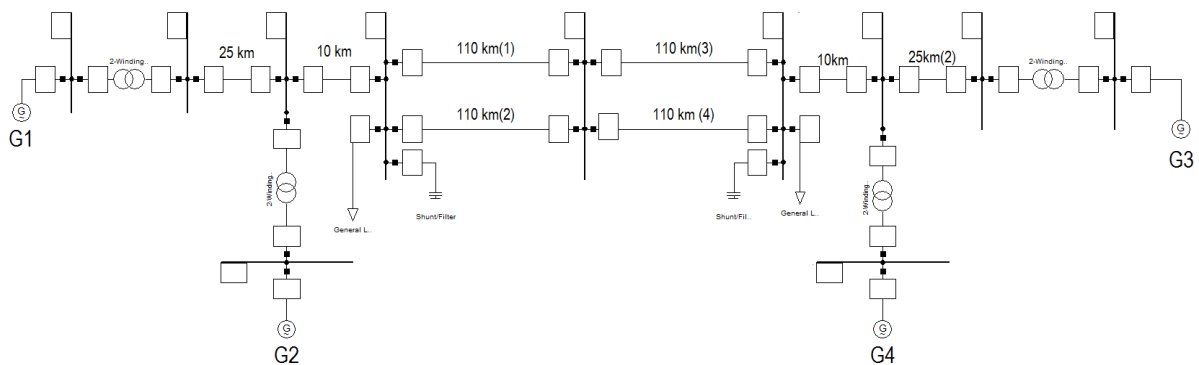


Рис.2 Тестова 4 – х машинна схема

Відповідні параметри елементів моделі ЕС та налаштування систем АРЗ і PSS, що використовувались при дослідженнях приведені в [8].

Результати застосування модального аналізу для розглянутої схеми без застосування систем регулювання дають три комплексно – спряжених власних чисел, що відповідають двом локальним модам з частотами 0,998 Гц та 1,005 Гц і одній міжсистемній моді з частотою 0,484 Гц. Локальні моди коливання достатньо демпфовані (коефіцієнт демпфування становить 6,9%), а міжсистемна мода коливання є небезпечною, оскільки коефіцієнт демпфування становить всього 1,6%.

При застосуванні на всіх генераторах лише АРЗ з високим коефіцієнтом підсилення система стає нестійкою, оскільки в міжсистемна мода коливання має від’ємний коефіцієнт демпфування, що свідчить про розташування відповідного власного числа в правій частині комплексної площини. В цьому випадку стає необхідним застосування додаткових пристроїв демпфування НЧК.

У відповідності з описаним методом в рамках виконання модального аналізу були розраховані спостережуваність, керованість та залишки даної небезпечної міжсистемної моди коливання. В результаті даних розрахунків було визначено, що саме 3-й генератор найбільшим чином впливає на дану моду коливання, тобто слугує оптимальним місцем встановленням для системного стабілізатору PSS та, відповідно, для додаткового контролера демпфування з вхідним сигналом від СМПР. При виборі глобального сигналу від пристроїв СМПР, який буде поступати на додатковий вхід використано визначення залишку, як чутливості між входом та виходом системи, тобто як відношення зміни перетоку активної потужності по ЛЕП до зміни напруги збудження генератора:

$$\max \left[ \lim_{s \rightarrow \lambda_i} (s - \lambda_i) \frac{P}{U} \right] = \max \frac{\Delta P}{\Delta U} \quad (7)$$

Вхідним сигналом контролера демпфування теоретично можуть бути також реактивна потужність лінії, величина струму лінії, величини напруг на шинах і т.п., але світовий досвід побудови подібних систем показав, що саме активна потужність є найбільш придатною для цієї ролі. Тому для контролера демпфування коливань в якості вхідного сигналу для початкових дослідів була обрана активна потужність по одній з міжсистемних ЛЕП 110 км(1).

В загальному вигляді запропонована система демпфування НЧК режимних параметрів з глобальним сигналом від пристроїв СМІР в додатковий контролер демпфування для можливих засобів представлено на рис.3

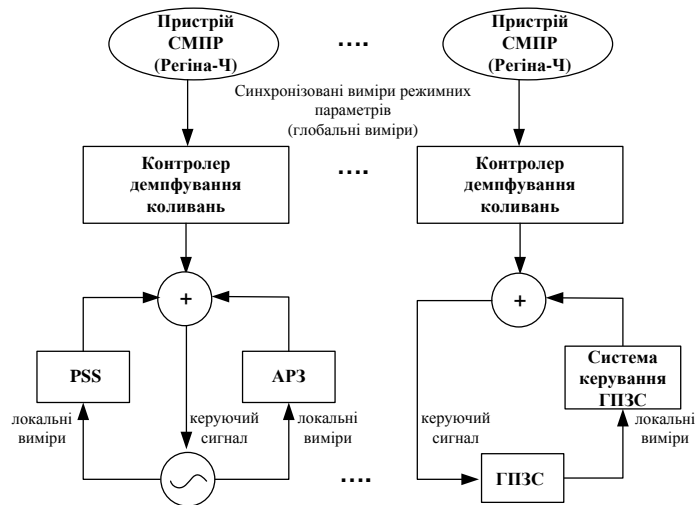


Рис. 3 Структурна схема система демпфування НЧК режимних параметрів з додатковим вхідним сигналом від пристроїв СМІР

Дослідження ефективності демпфування коливань перетоку активної потужності по міжсистемній ЛЕП – 110 кВ виконано для випадку збільшення активної потужності навантаження General Load (навантаження в зоні 1) на 10% представлені на рис. 4 при наявності наступних систем регулювання:

1. на всіх генераторах встановлені лише АРЗ;
2. на всіх генераторах встановлені АРЗ і на G\_3 встановлено PSS;
3. на всіх генераторах встановлені АРЗ і на G\_4 встановлено PSS;
4. на всіх генераторах встановлені АРЗ і на G\_3 встановлено PSS та додатковий контролер демпфування з вхідним сигналом перетоку активної потужності по міжсистемній ЛЕП з пристрою СМІР.

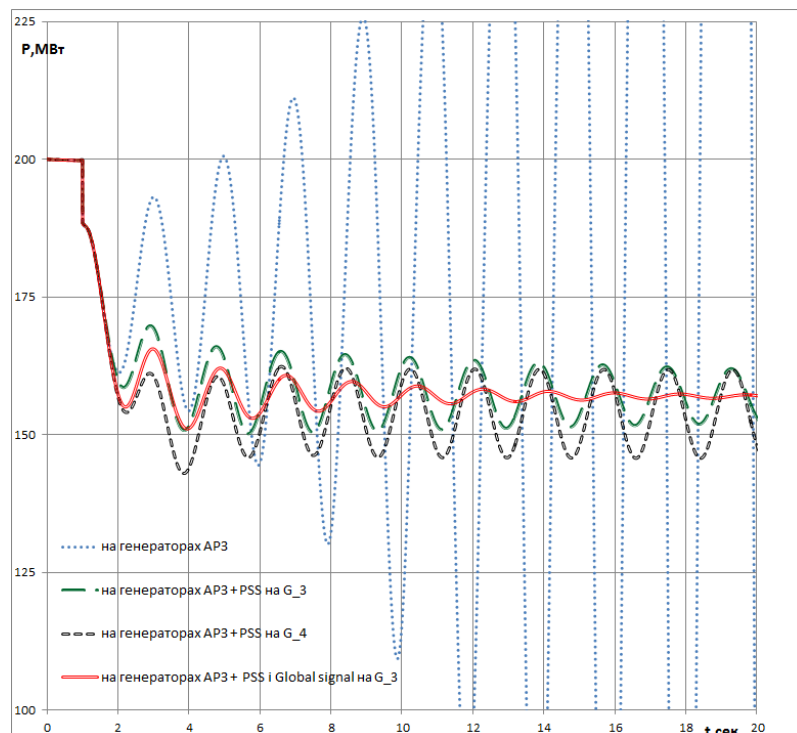


Рис.4 Зміна перетоку активної потужності по ЛЕП 110 км(1) при збільшенні активної потужності навантаження General Load (навантаження в зоні 1) на 10%

Розрахунок модального аналізу у випадку наявності на генераторах лише AP3 з високим коефіцієнтом підсилення ( $K = 200$ ) повністю підтверджується представленим перехідним процесом, тобто при виникненні збурення в системі спостерігаються наростаючі коливання – система стає нестійкою. Порівняння графіків зміни перетоку активної потужності по міжсистемній ЛЕП при різному розташуванні PSS (G\_3 та G\_4) показує правильність вибору місця встановлення системного стабілізатору PSS на 3-му генераторі, оскільки в даному випадку демпфування більш ефективне.

Також з рис. 4 видно, що використання на генераторі G\_3 в складі AP3 системного стабілізатору PSS та додаткового контролера демпфування з вхідним сигналом перетоку активної потужності по міжсистемній ЛЕП з пристрою СМПП сприяє зменшенню динамічних відхилень та числа коливань перетоку активної потужності, чим забезпечує ефективне демпфування міжсистемних коливань в перехідних режимах. Це особливо актуально в умовах завантажених ЛЕП, коли додаткове збільшення перетоку активної потужності може призвести до порушення паралельної роботи ЕС.

### **Висновки**

Застосування в пристроях демпфування, зокрема в системі AP3 і PSS на станційному рівні, додаткового каналу з вхідним сигналом від пристроїв СМПП, в якому небезпечні НЧК мають високу спостережуваність забезпечує ефективне демпфування локальних та міжсистемних НЧК без використання додаткових коштовних пристроїв демпфування на мережевому рівні. Запропонований метод залишків підтверджує свою ефективність при виборі оптимальних місць встановлення пристроїв демпфування, виборі необхідних сигналів та параметрів налаштування контролера демпфування коливань. Проведені дослідження мають вагомe значення в умовах перспективної інтеграції ОЕС України до асоціації ENTSO\_E, оскільки однією з обов'язкових вимог щодо можливості реалізації паралельної роботи ОЕС України з об'єднанням європейських країн є здійснення ефективного демпфування коливань потужності.

Подальші роботи в цьому напрямку пов'язані з дослідженням централізованої системи демпфування НЧК в ЕЕС на станційному та мережевому рівнях при використанні синхронізованих векторних вимірів з пристроїв СМПП в якості додаткових сигналів в засоби демпфування.

### **Список літератури**

1. Graham Rogers, Power System Oscillations, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000, 328p.
2. Floyd Galvan, Charles H. Wells, Entergy WAMS Experiences (2004 – 2008), USA, 2008, 11p.
3. Яндутьський О.С., Марченко А.А., Олєфір Д.О., Мацейко В.В. Дослідження низькочастотних коливань потужності в ОЕС України // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2013. – С. 43–48.
4. G. T. Tse and S. K. Tso, Refinement of conventional PSS design in multimachine system by modal analysis, IEEE Transactions on power systems, Vol. 8, 1993, pp. 598-605.
5. Буткевич О. Ф. Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб'єднань / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Праці Інституту електродинаміки НАН України : зб. наук. праць. Спец. вип. — 2010. — С. 72—77.
6. Laszlo Gyugyi, Narain G. Hingorani, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems – Wiley-IEEE Press, 1999, 452p.
7. R. Sadikovic, P. Korba and G. Andersson, Application of FACTS Devices for Damping of Power System Oscillations, PowerTech, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.
8. P. Kundur, "Power Systems Stability and Control", Electrical Power Research Institute Series, McGraw Hill, New York, 1994, 1176p.
9. M. E. Aboul-Ela, A. A. Salam, J. D. Mc Calley and A. A. Fouad, Damping controller design for power system oscillations using global signals, IEEE Transactions on Power System, Vol 11, No. 2, May 1996, pp. 767-773.

**O. Yandulskyy, V. Matseyko, D. Katrych**

**National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»**

### **DAMPING OF LOW FREQUENCY OSCILLATIONS USING SYNCHROPHASOR MEASUREMENTS FROM WIDE AREA MEASUREMENT SYSTEM**

*Increased progress of power systems has led to a structure of close generator groups connected to other groups by weak transmission lines. This has been known to cause oscillations were these groups oscillate against each other in an inter area fashion. This implies that power oscillates between areas and thus diminishes the transmission capability of the interconnected system.*

*Growing oscillations eventually lead to loss of synchronism in a power system which can cause damage. In order to prevent damage under such circumstances, generators would have be disconnected from the system.*

*This can cause disturbances or even worse, blackouts. Damping of oscillations thus plays a significant role in power system security by securing and increasing supply and transmission capability of the system. Some power system blackout incidents due to low frequency oscillation are given in the paper.*

*The actual questions of the study of low-frequency oscillations of power in the interconnected power system (IPS) of Ukraine in terms of introduction of modern Wide Area Measuring System (WAMS) are considered. This paper describes the damping controller design for power system oscillations in interconnected power systems by means of using recordings of a WAMS. The global signal from Phasor Measurement Unit is an additional global signal for damping interarea modes. The choice of location, input signals and tuning of power oscillation damping controller based on residue method. The effectiveness of the proposed power oscillation damping controller are tested on a Kundur's two - area system in DigSilent Power Factory.*

**Key words:** low frequency oscillations, Wide Area Measuring System, modal analysis, residue method, damping, power oscillation damping controller.

1. Graham Rogers, Power System Oscillations, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000, 328p.
2. Floyd Galvan, Charles H. Wells, Entergy WAMS Experiences (2004 – 2008), USA, 2008, 11p.
3. Yandulskyy O., Marchenko A., Olefir D., Matseyko V., Investigation of low frequency power oscillations in integrated power system of Ukraine // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Spetsialnyi випуск., 2013, pp. 43-48.
4. G. T. Tse and S. K. Tso, Refinement of conventional PSS design in multimachine system by modal analysis, IEEE Transactions on power systems, Vol. 8, 1993, pp. 598-605.
5. Butkevitch O., Some aspects of low-frequency oscillations monitoring operational parameters of integrated power systems / Butkevitch O., Chizhevsky V. // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Spetsialnyi випуск., 2010, p.72—77.
6. Laszlo Gyugyi, Narain G. Hingorani, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems – Wiley-IEEE Press, 1999, 452p.
7. R. Sadikovic, P. Korba and G. Andersson, Application of FACTS Devices for Damping of Power System Oscillations, PowerTech, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.
8. P. Kundur, "Power Systems Stability and Control", Electrical Power Research Institute Series, McGraw Hill, New York, 1994, 1176p.
9. M. E. Aboul-Ela, A. A. Salam, J. D. Mc Calley and A. A. Fouad, Damping controller design for power system oscillations using global signals, IEEE Transactions on Power System, Vol 11, No. 2, May 1996, pp. 767-773.

УДК 621.311

**А.С. Яндульский**, д-р техн. наук, профессор  
**В.В. Мацейко, Д.В. Катрич**

**Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"  
ДЕМПФИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ  
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОТ УСТРОЙСТВ СМНР**

*Рассмотрены актуальные вопросы исследования низкочастотных колебаний (НЧК) мощности в Объединенной электроэнергетической системе (ОЭС) Украины в условиях внедрения современных систем мониторинга переходных режимов (СМНР). Проанализированы основные методы и средства уменьшения влияния НЧК на режимы работы энергосистем и обоснована целесообразность использования синхронизированных измерений режимных параметров в качестве дополнительных входных сигналов в средства демпфирования. Для выбора оптимальных мест установки устройств демпфирования, выбора необходимых сигналов и параметров настройки контроллеров демпфирования колебаний использован метод остатков. Проведено моделирование режимов работы энергосистемы в программной среде Power Factory для подтверждения эффективности предложенного подхода.*

**Ключевые слова:** низкочастотные колебания, система мониторинга переходных режимов, демпфирования, контроллер демпфирования колебаний.

Надійшла 30.11.2014

Received 30.11.2014