

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ НА ОСНОВІ
СИНХРОНІЗОВАНИХ ВЕКТОРНИХ ВИМІРІВ**

О.С.Яндульський, докт.техн.наук, **А.А.Марченко**, канд.техн.наук, **В.В.Мацейко**
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: fea@kpi.ua

Розглянуто актуальні питання дослідження низькочастотних коливань потужності в ОЕС України в умовах впровадження сучасних систем моніторингу перехідних режимів. Представлено результат співставлення розробленого алгоритму ідентифікації домінуючих частот коливань та розрахунку їхніх параметрів, що базується на використанні синхронізованих векторних вимірів, з традиційним розрахунком коливальних властивостей енергосистем методом модального аналізу в програмному середовищі Power Factory фірми DigSilent. Проведено аналіз основних властивостей та визначено рівень безпеки виявлених коливань з точки зору демпфування коливань. Бібл. 5, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: низькочастотні коливання, система моніторингу перехідних режимів, спектральний аналіз, модальний аналіз, демпфування.

Досвід експлуатації сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС) світу показує, що зниження надійності функціонування ЕЕС та обмеження можливості нормальної роботи виникає внаслідок появи системних коливань, що особливо спостерігається при наявності слабких міжсистемних зв'язків. Світова практика налічує численні аварії, причиною яких стали низькочастотні коливання (НЧК) режимних параметрів [3]. У зв'язку з цим дослідження коливальних властивостей ЕЕС, зменшення впливу НЧК на режими роботи та підвищення стійкості ЕЕС є одними з головних задач систем диспетчерського управління.

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 (КЗ). Крім того, режими коливань виникають при неправильному налаштуванні різного типу регуляторів, автоматики та компенсуючих конденсаторних пристроїв [5].

Впровадження систем моніторингу перехідних режимів (СМНР) і поява нових інформаційних технологій вивели дослідження та аналіз НЧК в ЕЕС на якісно новий рівень. Дані технології синхронізованих векторних вимірів параметрів електромеханічних перехідних режимів створили нові можливості виявлення НЧК як в *off-line*, так і в *on-line* режимах. Перспективою ідентифікації НЧК та їхніх параметрів є подальше використання даної інформації для формування управляючих дій по демпфуванню небезпечних коливань, сигналізації про небезпеку режиму та визначення необхідних дій щодо зниження рівня даної небезпеки [4].

Як відомо, Об'єднана електроенергетична система (ОЕС) України характеризується наявністю потужних ЕЕС з відносно слабкими міжсистемними зв'язками. Недостатня пропускна здатність ЛЕП для видачі потужності з атомних електростанцій, передача надлишкової потужності Західного регіону в центр та на схід країни по зазначених слабких зв'язках, а також інші взаємопов'язані чинники створюють характерні умови та підґрунтя для появи небезпечних НЧК з точки зору забезпечення стійкості ОЕС. Станом на кінець 2013 р. на об'єктах ОЕС України (дві електростанції та 22 підстанції) розміщено 24 пристрої СМНР вітчизняного виробництва типу "Регіна-Ч", які забезпечують моніторинг 75 повітряних ліній (ПЛ) напругою 220–750 кВ. Таким чином, сучасні умови стану та розвитку енергетики України обумовлюють необхідність дослідження та ідентифікації НЧК перетоків активної потужності по головних ЛЕП ОЕС України на основі синхронізованих вимірів режимних параметрів. В основу представленого методу ідентифікації НЧК потужності покладено спектральний аналіз, а саме швидке перетворення Фур'є (ШПФ), яке представляє собою добре опрацьовану та закінчену теорію. Побудова амплітудно-частотних спектрів перетоків активної потужності при використанні синхронізованих вимірів методом ШПФ забезпечує ідентифікацію домінуючих частот коливань, які присутні та переважають у розглянутих сигналах. Повторне застосування спектрального аналізу до досліджуваних сигналів перетоків активної потужності на часових інтервалах, що відповідають періодам ідентифікованих домінуючих частот, дає можливість визначення амплітуд двох послідовних періодів коливань. Подальший алгоритм дослідження НЧК домінуючої частоти ґрунтується на використанні визначених величин та включає розрахунок основних характеристик коливального процесу (декремент загасання, логарифмічний декремент загасання, коефіцієнт загасання, час загасання, коефіцієнт демпфування), детальний опис якого представлено в [3].

Додаткове визначення властивостей коливального процесу здійснюється шляхом відтворення власного числа, що відповідає ідентифікованій моді коливання, розрахунку його величини та кута. Зображення власних чисел на комплексній площині в координатах дійсної та уявної частин дозволяє наочно та швидко оцінити не-

безпеку поточних режимів роботи ЕЕС з точки зору недостатнього демпфування виявлених коливань та можливого порушення коливальної стійкості ЕЕС.

Достовірність та адекватність запропонованого алгоритму дослідження НЧК перевірено шляхом співставлення результатів проведених розрахунків з традиційним розрахунком коливальних властивостей ЕЕС методом модального аналізу в програмному середовищі Power Factory для 3-х вузлової схеми, яка складається з двох генераторів та ШНП – шин нескінченної потужності (система), показаної на рис. 1.

Зазначимо, що модальний аналіз в Power Factory представляє собою аналіз лінеаризованої системи диференціальних рівнянь з використанням QR-алгоритму (безпосередньо використовувався при проведенні описаних досліджень) або методів вибіркового аналізу. Отримані власні числа матриці ЕЕС $\lambda_j = \delta_j \pm j\omega_j$ дозволяють визначити найбільш небезпечні моди коливань системи, які, загалом, відповідають можливим режимам коливань.

Як збурення було обрано виникнення 3-ф. КЗ на ЛЕП-1 у момент часу 1 с тривалістю 0,2 с. Результати застосування модального аналізу для розглянутої схеми представлені в табл. 1 (виділено по одному комплексному числу з отриманих комплексно-спряжених чисел, що розміщуються в верхній частині комплексної площини).

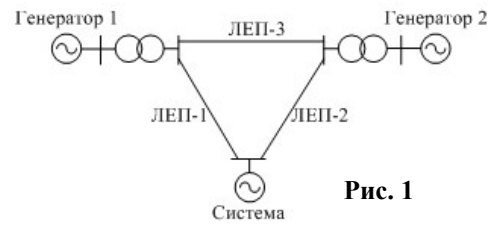


Рис. 1

Таблиця 1

Name	Real part, 1/s	Im.part, rad/s	Magnitude, 1/s	Angle, deg	Damped Frequency, Hz	Period, s	Damping, 1/s	Damp. Ratio	Damping Time Const., s	Ratio A1/A2
Mode6	-1,808	10,927	11,076	99,393	1,74	0,575	1,808	0,163	0,553	2,827
Mode8	-1,228	9,857	9,933	97,100	1,56	0,637	1,228	0,124	0,814	2,187

Програмне забезпечення Power Factory в рамках виконання модального аналізу дозволяє для кожної моди коливань визначити генератори, які найбільше впливають на коливання. Так, мода коливання з частотою 1,74 Гц ініціюється протифазними коливаннями генераторів між собою, а 1,56 Гц – синфазними коливаннями генераторів по відношенню до ШНП. Для реалізації запропонованого алгоритму значення перетоків активної потужності по ЛЕП були експортовані з Power Factory з періодом дискретизації 0,01 с (для порівняння – період дискретизації пристроїв Регіна-Ч становить 0,02 с) тривалістю 10,14 с, що забезпечує можливість ідентифікації частотних складових з кроком 0,09 Гц. Результати розрахунку по кожній з ЛЕП зведені до табл. 2.

Таблиця 2

Лінія	f , Гц	T , сек	$A1$, МВт	$\frac{A_1}{A_2}$	θ	β , 1/сек	τ , сек	ξ	$\lambda = \sigma + j\omega$	$ \lambda $, 1/сек	φ , град
ЛЕП-1	1,56	0,641	390	2,12	0,751	1,172	0,853	0,119	-1,172+j9,803	9,873	96,8
ЛЕП-2	1,56	0,641	370	2,088	0,736	1,149	0,871	0,116	-1,149+j9,803	9,870	96,6
ЛЕП-3	1,56	0,641	33,2	2,776	1,021	1,593	0,628	0,160	-1,593+j9,803	9,932	99,1

Порівняння відповідних значень у цих таблицях показує, що ідентифікація домінуючих частот НЧК на основі спектрального аналізу синхронізованих вимірів з розрахунком параметрів виявлених коливань для розглянутої схеми дає можливість визначити одну домінуючу частотну складову 1,56 Гц, яка присутня в перетоках активної потужності, що співпадає з розрахунками модального аналізу програмою Power Factory. До того ж, як зазначено в [5], найчастіше переважає в перехідному процесі і буде слабозагасаючою мода коливання з найменшим коефіцієнтом загасання. Як видно з табл. 1, саме мода коливання з частотою 1,56 Гц має менший коефіцієнт загасання та ідентифікується запропонованим алгоритмом як домінуюча в перетоках активної потужності по ЛЕП. Крім того, особливість НЧК перетоків активної потужності по ЛЕП полягає у тому, що найбільші амплітудні значення коливань спостерігаються на ЛЕП, які з'єднують генератори, що коливаються, і систему [1]. Табл. 2 підтверджує це, оскільки розрахована початкова амплітуда коливань по ЛЕП між генераторами та ШНП значно більша, ніж амплітуда по ЛЕП між генераторами.

На рис. 2 показано суміщене розміщення власних чисел моди коливання з частотою 1,56 Гц, розрахованих двома розглянутими підходами.

В площині комплексних чисел наочно відображується рівень безпеки ідентифікованого коливання з точки зору демпфування коливань. Пунктирною лінією обмежено зону небезпечних режимів – праворуч від неї коефіцієнт демпфування менший, ніж 5%.

У деяких джерелах, зокрема у [4], критичним значенням коефіцієнта демпфування є величина 2–3%, коли відповідні коливання вважаються небезпечними в аспекті порушення коливальної стійкості. Таким чином, коливальні властивості виявлених НЧК перетоків активної потужності, отримані шляхом обробки синхронізованих вимірів з пристроїв СМПП, відповідають

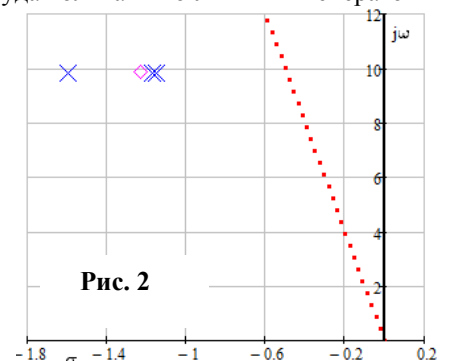


Рис. 2

розрахованим модальним аналізом власним числам ЕЕС, що підтверджує ефективність застосування представленого алгоритму ідентифікації НЧК. Як відомо, існуючий підхід до аналізу коливальної стійкості [2] не може в повній мірі врахувати весь спектр схемно-режимних ситуацій через неповноту моделей, еквівалентування розрахункових схем заміщення, відсутність в деяких випадках врахування властивостей ЕЕС та наявних регуляторів, які мають вплив на коливальну стійкість. Ідентифікація НЧК на основі точних синхронізованих вимірів на відміну від заздалегідь заданої моделі, орієнтується на властивості реальної системи, що дозволяє аналізувати поточну ситуацію, а не «найгірший випадок», як це робиться в традиційних підходах. У зв'язку з цим представлені дослідження НЧК перетоків активної потужності по синхронізованих векторних вимірах перехідних процесів можуть слугувати додатковим методом верифікації динамічних моделей. Практичне застосування даного алгоритму та аналіз основних властивостей низькочастотних коливань перетоків активної потужності по міждержавних та внутрішніх ЛЕП при виникненні збурень різної величини у системоутворюючій мережі ОЕС України представлені в [3]. Запропонований алгоритм може забезпечити відповідні підрозділи ДП НЕК «Укренерго» необхідною інформацією щодо виникнення небезпечних коливальних порушень у системі при протіканні відповідних аварійних процесів шляхом накопичення обробленої інформації для випадків різних збурень, визначення слабких зв'язків в енергосистемі, розробки рекомендації для встановлення необхідних сучасних пристроїв демпфування низькочастотних коливань.

1. Бердин А.С., Герасимов А.С., Захаров Ю.П., Коваленко П.Ю. Методы исследования нелинейных и нестационарных свойств низкочастотных колебаний в энергосистеме / 4-я Межд. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург, 2013. CD-ROM CIGRE. – С. 2.2–5.
2. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. – СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012.
3. Дослідження впливу низькочастотних коливань перетоків на режим роботи ОЕС України при регулюванні частоти та активної потужності. Етап II. Оцінка впливу низькочастотних коливань на регулювання сальдо перетоків потужності у міждержавних та внутрішніх перетинах. Звіт про науково-дослідну роботу. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 150 с.
4. D.Wilson, P.McNabb, J.Bialek. Classification of mode damping and amplitude in power system using synchrophasor measurements and classification trees // IEEE Transactions on power systems. – May 2013. – Vol.28. – No.2. – 9 p.
5. Graham Rogers. Power System Oscillations. – 2000, Kluwer Academic Publishers, Boston, London, Utrecht.

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.С.Яндульский, докт.техн.наук, А.А.Марченко, канд.техн.наук, В.В.Мацейко

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. e-mail: fea@kpi.ua

Рассмотрены актуальные вопросы исследования низкочастотных колебаний мощности в ОЭС Украины в условиях внедрения современных систем мониторинга переходных режимов. Представлен результат сопоставления разработанного алгоритма идентификации доминирующих частот колебаний и расчета их параметров, основанного на использовании синхронизированных векторных измерений, с традиционным расчетом колебательных свойств энергосистем методом модального анализа в программной среде Power Factory фирмы DigSilent. Проведен анализ основных свойств и изображен уровень опасности выявленных колебаний с точки зрения демпфирования колебаний. Библ. 5, рис. 2, табл. 2.

Ключевые слова: низкочастотные колебания, система мониторинга переходных режимов, спектральный анализ, модальный анализ, демпфирование.

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF LOW FREQUENCY OSCILLATIONS USING SYNCHROPHASOR MEASUREMENTS

O.Yandulskyi, A.Marchenko, V.Matseiko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. e-mail: fea@kpi.ua

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.

This paper describes the identifying modes of oscillations in interconnected power systems by means of using recordings of a Wide Area Measuring System. To detect the dominant oscillation frequency, the Fast Fourier Transform is applied. The algorithm is tested on known test system and results were compared with the results of modal analysis of power system. It is obvious from the analysis that further investigations are necessary to improve system damping. This is an important goal not only to ensure reliable system operation but also to improve transmission capacity of the grid with the existing high voltage lines. References 5, tables 2, figures 2.

Key words: low frequency oscillations, Wide Area Measuring System, spectrum analysis, modal analysis of power systems, dominant oscillation frequency, damping.

1. Berdin A., Gerasimov A., Zakharov Yu., Kovalenko P. Methods of study of nonlinear and non-stationary properties of low-frequency oscillations in the system / 4-ia Mezhdunarodnaia tekhnicheskaja konferentsiia "Sovremennye napravleniia razvitiia sistem releinoi zashchity i avtomatiki energosistem". – Екатеринбург, 2013. CD-ROM CIGRE. – Pp. 2.2–5. (Rus)
2. Stability of power systems. Guidelines. – SOU-N MEV 40.1-00100227-68:2012. (Ukr)
3. Investigation of influence of low-frequency oscillations to operating modes of IPS of Ukraine in the regulation of frequency and active power. Stage II. Estimation of influence of low-frequency oscillations on regulating the balance of power flowing in international and internal crossing. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu. – Kyiv: Natsionalnyi Tekhnichniy Universytet Ukrainy «KPI», 2013. – 150 p. (Ukr)
4. D.Wilson, P.McNabb, J.Bialek. Classification of mode damping and amplitude in power system using synchrophasor measurements and classification trees // IEEE Transactions on power systems. – May 2013. – Vol.28. – No.2. – 9 p.
5. Graham Rogers. Power System Oscillations. – 2000, Kluwer Academic Publishers, Boston, London, Utrecht.

Надійшла 24.02.2014