УДК 621.311

О. С. Яндульський[1]
О. В. Тимохін[1]
Г. О. Труніна[1]
А. Б. Нестерко[1]

ВИЗНАЧЕННЯ КОГЕРЕНТНИХ ГРУП ГЕНЕРАТОРІВ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМИ

[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Метою впровадження системи моніторингу перехідних процесів є підвищення надійності та якості електропостачання шляхом аналізу характеристик ЕЕС на основі синхронізованих вимірів перехідних процесів. Обробка отриманих з системи моніторингу перехідних режимів (СМПР) даних дозволяє здійснювати оцінку динамічних характеристик електроенергетичної системи (ЕЕС) в реальному часі. В роботі досліджені електромеханічні перехідні процеси багатомашинних ЕЕС, для виділення когерентних груп генераторів (КГГ), склад яких інваріантний відносно місця та характеру збурення. Актуальність дослідження зумовлена можливістю порушення статичної коливної стійкості ЕЕС на частотах, що відповідають модам коливань когерентних груп генераторів з повільною когерентністю. В статті проаналізовано перехідні режими ЕЕС, визначено склад та характеристики КГГ з повільною когерентністю.

Ключові слова: електроенергетична система, система моніторингу перехідних режимів, регулювання частоти, запас кінетичної енергії, когерентні групи генераторів, спектральний аналіз, кластеризація.

Вступ та постановка задачі дослідження

Одним з пріоритетів розвитку ЕЕС світу є створення та впровадження систем моніторингу перехідних режимів, які використовуються для підвищення рівня інформаційного забезпечення та якості управління режимами ЕЕС та енергооб'єднань. Особливістю СМПР, на відміну від існуючих систем телеметрії, є часова синхронізація вимірюваних параметрів режимів і висока дискретність реєстрації параметрів, що використовуються під час аналізу причин і наслідків технологічних порушень і системних аварій, верифікації динамічних моделей ЕЕС, оцінюванні станів ЕЕС, вирішенні завдань інформаційного забезпечення оперативно-диспетчерського керування.

Вплив збурення на режим окремих частин ЕЕС зменшується з віддаленням від місця виникнення збурення (МВЗ) через «розсіяння енергії», наявності зон нечутливості регуляторів швидкості генераторів та ін. Показники ступеня впливу збурення основані на оцінці «електричної віддаленості» (взаємна провідність) або «віддаленості по сприйняттю» (синхронізуюча потужність) від МВЗ.

Повнота моделювання елемента ЕЕС за заданого збурення визначається значимістю елемента ЕЕС за його впливом на характер перехідного процесу. Велику значимість мають елементи (генератори і навантаження), що характеризуються великою потужністю і сильними зв'язками з системою. Під час перехідного процесу в ЕЕС синхронізуюча потужність утримує електричну частоту обертання поля статора синхронних генераторів/двигунів однаковою для усіх агрегатів, приєднаних до мережі. Проте у зв'язку з різним розподілом небалансу по агрегатах та наявністю слабких системних зв'язків при збуренні утворюються групи генераторів з миттєвими частотами, що в перехідному режимі дещо відрізняються між собою, не порушуючи загальний синхронізм системи — когерентні групи генераторів (КГГ) (по частоті) або кластери. Зазначимо, що кількісні оцінки значущості елементів ЕЕС не використовують характеристики збурення і тому інваріантні відносно них.

Спрощення математичного опису ЕЕС включає обґрунтування типів математичних моделей елементів за рахунок обґрунтованого нехтування другорядними факторами. На сьогодні спрощення математичної моделі ЕЕС за допомогою еквівалентування включає розв'язання двох основних задач: визначення підсистем (груп генераторів), що еквівалентуються і розрахунок параметрів еквівалентної моделі ЕЕС. Ідентифікація підсистем основана на критерії когерентності генераторів [1].

© О. С. Яндульський, О. В. Тимохін, Г. О. Труніна, А. Б. Нестерко, 2015

Важливо, щоб визначення когерентних груп генераторів здійснювалося швидко, без залучення традиційних розрахунків перехідних процесів, для яких необхідно чисельне розв'язання систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь великої розмірності. Дотримання вимог швидкості ідентифікації необхідно для розв'язання задач, як електромеханічного еквівалентування, так і сканування розрахункових ситуацій в разі формування набору небезпечних сценаріїв в темпі, близькому до реального часу. Модальний аналіз лінеаризованої моделі ЕЕС [2] свідчить про наявність значної кількості характерних коливань (мод), притаманних ЕЕС. За неконтрольованих змін в структурі ЕЕС існує ймовірність порушення статичної коливної стійкості саме на частотах, що відповідають слабодемпфованим модам, які утворюють КГГ з ПК. В роботі має бути визначений склад та характеристики КГГ з повільною когерентністю на модах, що за малого згасання можуть стати причиною порушення статичної коливної стійкості (системна аварія, розділення системи) [3, 4].

Когерентність груп генераторів може проявлятися на коротких (швидка когерентність) та на довгих (повільна когерентність) інтервалах часу. Основний інтерес дослідження становлять групи з повільною когерентністю, між якими в перехідних режимах можуть виникати низькочастотні коливання значної потужності. Важливою характеристикою КГГ з ПК є інваріантність складу груп до місця розташування та характеру збурення (коротке замикання, включення/відключення ЛЕП/генератора/навантаження). Вказана властивість дозволяє використовувати спрощену структуру ЕЕС відносно КГГ з повільною когерентністю.

Відомі методи структурного аналізу ЕЕС за даними перехідних процесів використовують інформацію про миттєві значення кутів напруги [5, 6], кутові швидкості та прискорення роторів синхронних генераторів [7], тощо для подальшої ідентифікації системи. Для задач електроенергетики найбільшого поширення отримали методи ERA та Проні [8]. Метод ERA дозволяє визначити лінійну модель об'єкта за відомою імпульсною характеристикою, отримання якої ускладнене для ЕЕС. Метод Проні використовує метод найменших квадратів для визначення коефіцієнтів розкладу згасаючих гармонік, що не гарантує успішність ідентифікації в заданих часових інтервалах. Перспективними методами ідентифікації динамічних еквівалентів ЕЕС в режимі, близькому до реального часу, є клас підпросторових методів, що дозволяють визначити лінійну модель об'єкта без використання його імпульсної характеристики [9].

Метою роботи є розробка підходу до визначення когерентних груп генераторів з повільною когерентністю під час перехідних процесів зміни частоти електроенергетичної системи на основі аналізу спектрального складу коливань частоти обертання роторів синхронних генераторів електроенергетичної системи. При цьому запропонований підхід повинен враховувати природу перехідних процесів, що досліджуються, а результати використання підходу мають задовольняти умові інваріантності складу КГГ щодо характеристик збурення.

Виклад основного матеріалу

Основні етапи спрощення динамічної моделі ЕЕС включають: визначення когерентних груп генераторів і агрегування когерентних груп генераторів в єдиний еквівалентний агрегат. Відомі способи ідентифікації когерентних груп генераторів [3] опираються на такі припущення:

— склад когерентних груп генераторів не залежить від збурення. Таким чином, когерентність може бути визначена шляхом розгляду лінеаризованої моделі системи;

— для визначення КГГ з ПК під час перехідних процесів зміни частоти використання класичної (2-го порядку) моделі синхронної машини вважається достатнім і регулювання збудження ігноруються.

Модальний аналіз лінійних моделей систем дозволяє визначити характерні коливання системи, а також ідентифікувати компоненти моделі (фізичні параметри системи), що мають найбільший вплив на характер коливань режимних параметрів (ліві власні вектори) та компоненти основний характер коливань яких визначається модами системи (праві власні вектори). Ідентифікація лінійної моделі ЕЕС для задачі визначення КГГ ЕЕС є надлишковою задачею. Аналіз спектрального складу даних перехідних режимів дозволяє отримати достатньо точну оцінку амплітуди та фази правих власних векторів за умови достатньої спостережуваності моди в зареєстрованих даних [10, 11].

Спектральний аналіз шести збурень в ОЕС України, для яких проведено розрахунок перехідного процесу зміни частоти обертання роторів синхронних генераторів, результати якого показано на рис. 1, показав високу спостережуваність моди з частотою близькою до 0,5 Гц (що характерно для великих електроенергетичних систем).

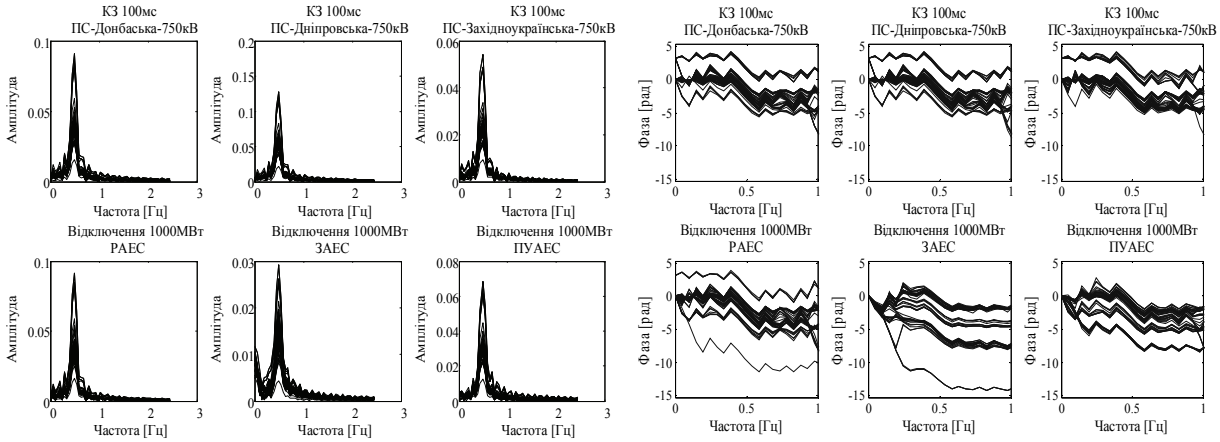

Рис. 1. Амплітудно-частотний спектр шести характерних збурень в ОЕС України

Використовуючи фазу та потужність коливання в спектрі (рис. 1) для моди 0,5 Гц як модуль та кут комплексного значення відповідного правого власного вектора, отримано векторні діаграми (рис. 2), які використані для визначення КГГ з ПК.

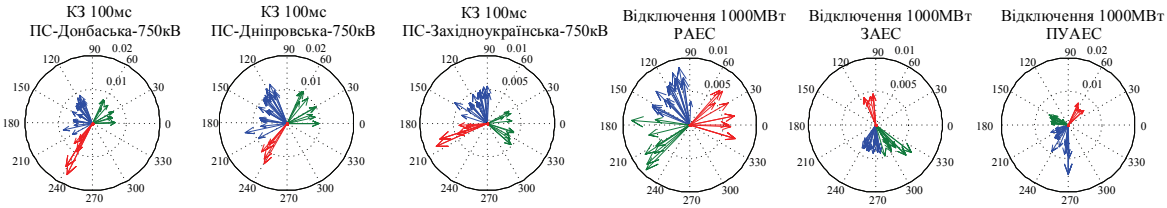

Рис. 2. Результати кластеризації для моди 0,5 Гц

Ідентифікація КГГ в множині СГ перехідних процесів зміни частоти обертання роторі вважається коректною, якщо схожість характеристик коливань будь-яких двох генераторів одного кластеру більше, ніж схожість будь-яких двох генераторів, що належать різним підсистемам. Критерій кластеризації повинен враховувати природу даних, що групуються. Для поставленої задачі дослідження найбільший інтерес становить визначення КГГ, між якими спостерігаються коливання перетоків потужності з максимальною амплітудою. Перетік потужності між двома системами визначається рівнянням

$$Ps + jQs = \frac{V_1 V_2 \sin(\delta) + j\left(V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\delta)\right)}{X}, \qquad (1)$$

де Ps, Qs — перетоки активної та реактивної потужності, відповідно, МВт; V_1, V_2 — модулі напруг шин прийомної та передавальної сторони, кВ; X — еквівалентний опір перетину між двома системами, Ом; δ — кут між векторами V_1 та V_2, рад.

Визначення когерентних груп генераторів є задачею структурного аналізу ЕЕС при цьому використовується симетрична матриця, ранг якої — число генераторів ЕЕС, а елементи — метрика, значення функції від фази та потужності коливання частоти обертання роторів генераторів в перехідному режимі [12].

Метрика для розбиття множини СГ ЕЕС на групи за критерієм мінімальних взаємних перетоків потужності має включати компоненти амплітуди коливань та значення взаємного кута між двома підсистемами (фази коливань). В роботі використано зважену евклідову метрику у формі:

$$d\left(\dot{S}_1, \dot{S}_2\right) = \sqrt{\left(\alpha\left(\left|\dot{S}_1\right| - \left|\dot{S}_2\right|\right)\right)^2 + \left(\beta\left(\arg\left(\dot{S}_1\right) - \arg\left(\dot{S}_2\right)\right)\right)^2}, \qquad (2)$$

де S_i — комплексні коефіцієнти спектрального розкладу коливання, α, β — нормуючі коефіцієнти амплітуди та фази коливання, відповідно.

В результаті кластеризації даних рис. 1, коли значення нормуючих коефіцієнтів α = 0,5, β = 2 та поріг когерентності d = 2, отримано 3 кластери (рис. 3).

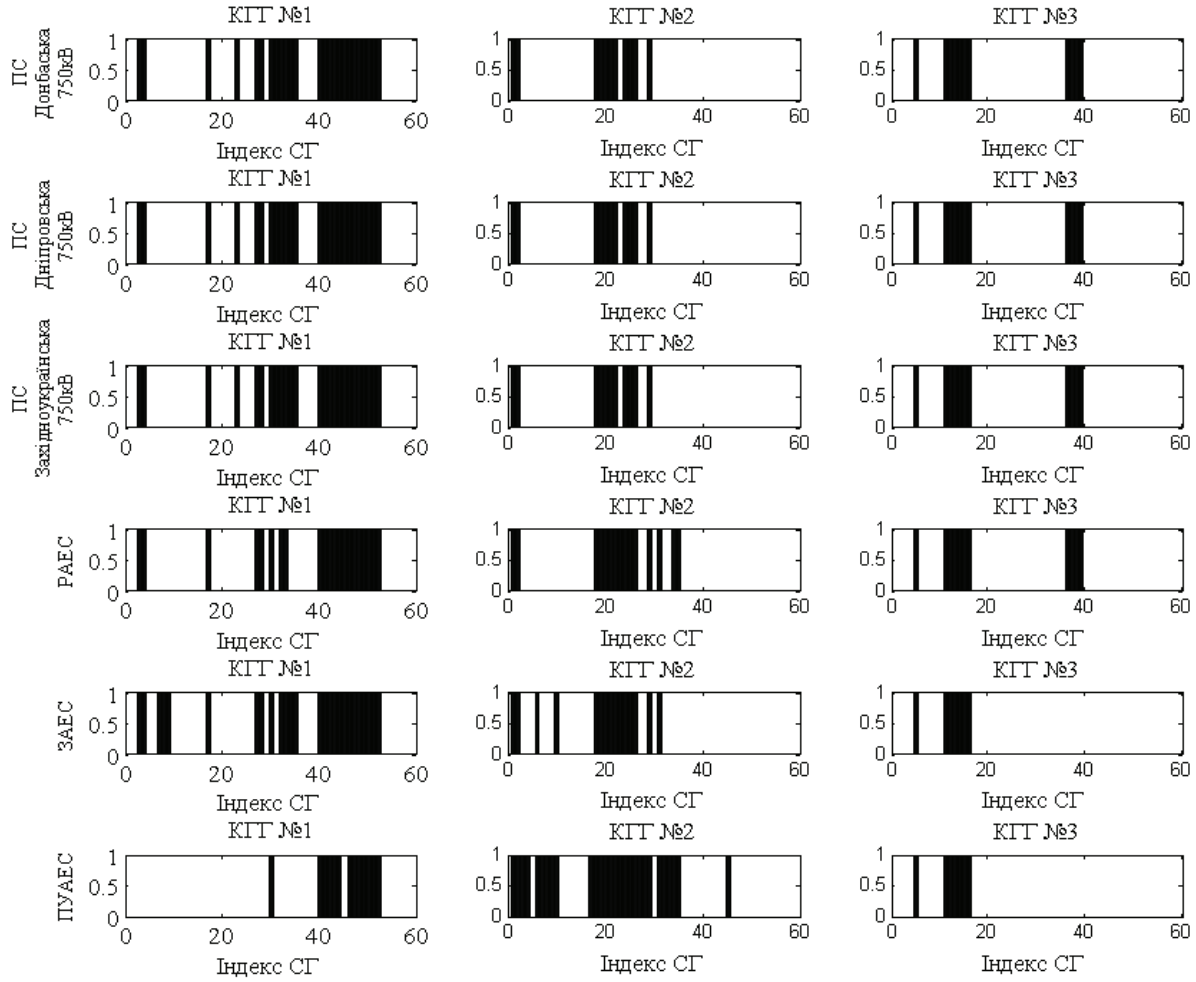

Рис. 3. Склад когерентних груп генераторів отриманих на основі ієрархічної кластеризації

Розбиття сукупності об'єктів на кластери передбачає подальший розгляд цих кластерів як нових агрегованих об'єктів. Для задач структурного аналізу ЕЕС точність агрегування визначається якістю кластеризації, а саме показниками: 1) максимальна міжкластерна відстань; 2) мінімальна внутрішньокластерна відстань; 3) рівномірний міжкластерний ймовірнісний розподіл; 4) якісне відображення характеристик груп їхніми центроїдами; 5) однорідність отриманих груп (відсутність порожнин в кластері); 6) стабільність результату кластеризації. У результаті ієрархічної кластеризації показники № 1, 2, 5, 6 можуть бути безпосередньо оцінені для кожної відстані об'єднання.

Важливо відмітити подібність результатів кластеризації (рис. 2) для усіх шести тестових сценаріїв. На підтвердження гіпотези про інваріантність результатів кластеризації КГГ з ПК на рис. 3 наведено склад КГГ.

Отримані в результаті ієрархічної кластеризації групи можуть задовольняти показники якості 1, 2, 5, 6. Проте залишається високою ймовірність нерівномірного міжкластерного розподілу та, відповідно, якості відображення характеристик груп їхніми центроїдами. Причиною можливого порушення показників 3, 4 може стати відсутність даних СМПР для усіх генераторів групи. Для компенсації впливу відсутніх даних на відображення характеристик груп їхніми центроїдами (центрів інерції) доцільно провести нормування спектральної потужності коливань генераторів в когерентних групах. Нормовані за амплітудою коливання з різною фазою (внутрішні коливання) при зворотному перетворенні спектрів Фур'є в сигнали будуть скомпенсовані. Зважена сума нормалізованих спектрів коливань КГГ (3) відображає нормований спектр центру інерції без «внутрішніх коливань».

$$S_i^{coi} = \sum_{j=1}^{n} \frac{S_{i,j}}{\left|S_{i,j}\right|} \Bigg/ \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\left|S_{i,j}\right|}, \tag{3}$$

де $S_{i,j}$ — спектр коливань j-го СГ в i-й когерентній групі генераторів.

В результаті оберненого перетворення Фур'є зважених сум нормалізованих спектрів коливань ПП, отриманих в результаті ієрархічної кластеризації визначено форму центроїдів (центрів інерції) ідентифікованих кластерів (рис. 4).

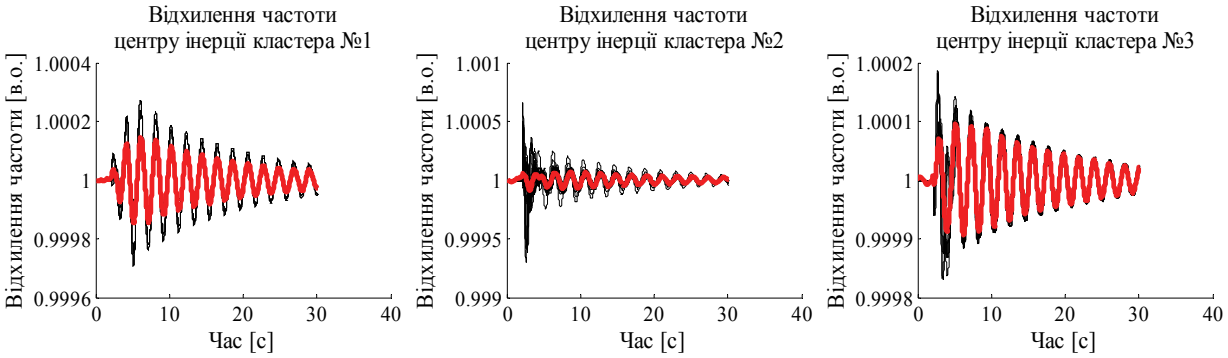

Рис. 4. Частоти центрів інерції трьох кластерів при збуренні на ЗАЕС

У випадку відсутності вимірювань по усім СГ когерентної групи, генератори, що мають більшу амплітуду коливань будуть мати більший вплив на результат визначення частоти центру інерції. Проте, більша амплітуда коливань свідчить про меншу постійну інерції агрегату, а тому частота обертання ротора такого генератора не має значного впливу на частоту центру інерції КГГ.

Висновки

Аналіз перехідних режимів ОЕС України виявив структурний поділ енергосистеми на когерентні групи синхронних генераторів. Домінантна частота електромеханічних коливань в ЕЕС склала близько до 0,5 Гц.

Запропонований в роботі підхід до визначення міжкластерної відстані на основі аналізу спектрального складу даних СМПР дозволив виявити три когерентні групи генераторів з повільною когерентністю. Результати кластеризації для шести тестових сценаріїв підтверджують гіпотезу про інваріантність складу когерентних груп генераторів з повільною когерентністю щодо місця та характеру збурення, що свідчить про ефективність використання запропонованого підходу.

Використаний в роботі підхід на основі нормування спектрів коливань частоти обертання роторів синхронних генераторів дозволяє підвищити якість відображення характеристик кластерів їхніми центроїдами, в тому числі у випадку відсутності зареєстрованих даних для всіх генераторів когерентної групи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Воропай Н. И. Структурный анализ электроэнергетических систем / Н. И. Воропай, Н. А. Абраменкова, Т. Б. Заславская. — Н. : Наука, 1990 — 221 с.

2. L.Gerin-Lajoie State-space system identification-toward MIMO models for modal analysis and optimization of bulk power systems / L.Gerin-Lajoie, KamwaI. // Power Systems, IEEE Transactions. — 2000. — № 15.1. — P. 326—335.

3. Chow J. H. New algorithms for slow coherency aggregation of large power systems / Chow J. H., R. J. Thomas // IMA Volumes in Mathematics and its Applications. — 1995. — № 64. — P. 95—100.

4. Kokotovi´c P. V. Systems and Control Theory for Power Systems / Kokotovi´c P. V. // IMA Volumes in Mathematics and its Applications. — 1994. — № 64.

5. Van Oirsouw P. Dynamic equivalents using modal coherency and frequency response / Van Oirsouw P. // IEEE Transactions on Power Systems. — 1990. — № 5 (l). — P. 289—295.

6. Pires de Souza E. An efficient methodology for coherency based dynamic equivalents / Pires de Souza E. // IEEE Proceedings. — 1992. — № 139 (5). — P. 371—382.

7. Hussain M. Y. Coherency identification and construction of dynamic equivalent for large power system / M. Y. Hussain, V. G. Rau // IEE Second International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong. — 1993. — № 1. — P. 887—892.

8. Chow J. H. Performance comparison of three identification methods for the analysis of electromechanical oscillations / Chow J. H., Sanchez-Gasca, Juan J. // IEEE Transactions on Power Systems. — 1999. — № 14.3. — P. 995—1002.

9. Яндульський О. С. Ідентифікація моделі електроенергетичної системи на основі синхронізованих вимірів режимних параметрів під час перехідних процесів / О. С. Яндульський, А. Б. Нестерко // Технічна електродинаміка. — 2015. — № 5. — С. 59—62.

10. Area decomposition for electromechanical models of power systems / J. H. Chow, B. Avramovic, P. V. Kokotovic, J. R. Winkelman // Automatica. — 1980. — № 16 (6). — P. 637—648.

11. Andersen P. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition / P. Andersen, R. Brincker, Z. Lingmi // Proc. of the 18 International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas. — 2000. — № 1. — P. 625—630.

12. Воропай Н. И. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / Н. И. Воропай, А. З. Гамм, О. Н. Войтов. — Нвсб. : Наука, 1999. — 256 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.11.2015

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

Тимохін Олександр Вікторович — старший викладач кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: timohin@fea.kpi.ua;

Труніна Ганна Олексіївна — аспірант, асистент кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: a_trunina@ukr.net;

Нестерко Артем Борисович — аспірант, асистент кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: nesterko@fea.kpi.ua.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

O. S. Yandulskyi[1]
O. V. Tymokhin[1]
H. O. Trunina[1]
A. B. Nesterko[1]

Coherent Generator Group Estimation during Electromechanical Transients in Power Systems

[1]National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

The main purpose of the wide area measurement system (WAMS) development is to increase the reliability and quality of power supply by analyzing the characteristics of the electrical power system using synchronized measurement of electromechanical transients. WAMS's data processing allows estimating dynamic characteristics of the electrical power system (EPS) in real time. This work is devoted to the study of the EPS electromechanical transients to estimate groups of coherent generators (CGG) the composition of which is invariant with respect to the place and the nature of the disturbance. The relevance of the study is determined by the possible violations of the static stability of EPS at frequencies corresponding to vibration modes of coherent groups of generators with slow coherence. The article analyzes the EPS transients and defines composition and characteristics CGG with slow coherence.

Keywords: electric power system, monitoring system transients, load frequency control, kinetic energy, coherent groups of generators, spectral analysis, clustering.

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

Tymokhin Oleksandr V. — Senior Lecturer of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: timohin@fea.kpi.ua;

Trunina Hanna O. — Post-Graduate Student, Assistant of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: a_trunina@ukr.net;

Nesterko Artem B. — Post-Graduate Student, Assistant of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: nesterko@fea.kpi.ua

А. С. Яндульский[1]
А. В. Тимохин[1]
А. А. Трунина[1]
А. Б. Нестерко[1]

Определение когерентных групп генераторов при электромеханических переходных процессах в электроэнергетических системах

[1]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Целью внедрения системы мониторинга переходных процессов является повышение надежности и качества электроснабжения путем анализа характеристик ЕЭС на основе синхронизированных измерений переходных процессов. Обработка полученных из системы мониторинга переходных режимов (СМПР) данных позволяет осуществлять оценку динамических характеристик электроэнергетической системы (ЭЭС) в реальном времени. В работе исследованы электромеханические переходные процессы многомашинных ЕЭС, для выделения когерентных групп генераторов (КГГ) состав которых инвариантен относительно места и характера возмущения. Актуальность исследования обусловлена возможностью нарушения статической устойчивости ЕЭС на частотах, соответствующих модам колебаний когерентных групп генераторов с медленной когерентностью. В статье проанализированы переходные режимы ЭЭС, определен состав и характеристики КГГ с медленной когерентностью.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, система мониторинга переходных режимов, регулирование частоты, запас кинетической энергии, когерентные группы генераторов, спектральный анализ, кластеризация.

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

Тимохин Александр Викторович — старший преподаватель кафедры автоматизации энергосистем, e-mail: timohin@fea.kpi.ua;

Трунина Анна Алексеевна — аспирант, ассистент кафедры автоматизации энергосистем, e-mail: a_trunina@ukr.net;

Нестерко Артем Борисович — аспирант, ассистент кафедры автоматизации энергосистем, e-mail: nesterko@fea.kpi.ua;