

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ ПОТУЖНОСТІ І МЕТОДИКА МОНІТОРИНГУ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

В.М.Авраменко, докт.техн.наук, **О.В.Мартинюк**, канд.техн.наук, **Т.М.Гурєєва**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: avr@ied.org.ua

Досліджено спектри коливань потужності по лініях енергосистеми. Показано, що в спектрі реального процесу коливань потужності по лінії 750 кВ відсутня домінуюча гармоніка. Запропоновано методику моніторингу рівня статичної стійкості енергосистеми, яка ґрунтується на розрахунку з використанням перетворення Фур'є коефіцієнта K_3 загасання коливань потужності по лініях після малого тестового збурення. Показано, що функція зв'язку коефіцієнта K_3 і коефіцієнта запасу стійкості по лінії K_p має індивідуальний характер для кожної лінії і може бути використана для on-line моніторингу рівня стійкості енергосистеми. Бібл. 5, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: енергосистема, перетин, статична стійкість, моніторинг, вільні коливання, перетворення Фур'є.

Коливання потужності по лініях електропередачі створює небезпеку порушення стійкості енергосистеми [2,4,5]. Така ситуація виникає тоді, коли частота зовнішніх збурень з боку навантаження у вузлах енергосистеми виявляється близькою до частоти вільних коливань після імпульсного збурення. Застосування перетворення Фур'є дозволяє знайти спектр для коливань, які не загасають, і може бути методичною основою для визначення рівня стійкості енергосистеми, а побудова методики моніторингу поточного рівня статичної стійкості електроенергетичної системи є метою даної роботи. Задачі, які при цьому розв'язувалися: визначення і дослідження амплітудно-частотного спектра реально зареєстрованого процесу зміни активної потужності по лінії 750 кВ; побудова методики моніторингу поточного запасу стійкості через розрахунки коефіцієнта загасання коливань потужності по лінії; дослідження спектрів і запасу стійкості режимів перетину ОЕС–Київ.

Дослідження спектра реального процесу. Використання в енергосистемах мікропроцесорних реєстраторів режимних параметрів дозволяє виконати спектральний аналіз реально зареєстрованого процесу зміни потужності по лінії високої напруги. Реальний процес є наслідком неперервних збурень як з боку навантаження, так і з боку оперативного і автоматичного керування режимом шляхом зміни потужності генераторів. Електровимірним пристроєм «Регіна» з дискретністю 0,02 с зареєстровані коливання активної потужності по лінії електропередачі 750 кВ Хмельницька АЕС–Київська для 10-хвилинного інтервалу 9:10:00...9:20:00 11.11.2013 р.

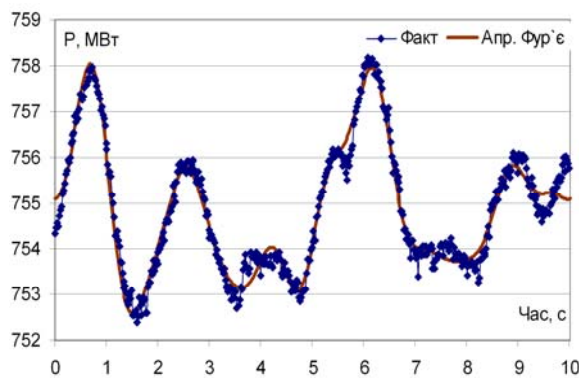


Рис. 1

У складі зареєстрованої інформації є коливання потужності, характер яких відповідає електромеханічним коливанням роторів синхронних генераторів, що можна побачити на рис. 1, де показано інтервал 9:10:00...9:10:10. В табл. 1 представлено амплітудно-частотні характеристики апроксимації процесу рядом Фур'є для інтервалу 9:10:00...9:10:10 та інтервалу 9:18:55...09:19:05 (f – частота, A – амплітуда). Параметри в табл. 1 свідчать про те, що в спектрі реального процесу відсутня домінуюча гармоніка.

Методика моніторингу рівня стійкості енергосистеми.

Спираючися на off-line виконані розрахунки запасів стійкості об'єкту в різних режимах, можна побудувати методику on-line розрахунку поточного рівня стійкості з використанням результатів оцінювання стану енергосистеми і перетворення Фур'є для перехідного процесу, розрахованого після тестового збурення. Пропонується методика моніторингу, яка має два етапи. На першому, підготовчому виконується об'єднання перетину, розрахунки перехідного процесу та амплітуд вільних коливань, і в результаті визначається функція

| Таблиця 1 | | | |
|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| Інтервал 9:10:00...9:10:10 | | Інтервал 9:18:55...9:19:05 | |
| f , Гц | A , МВт | f , Гц | A , МВт |
| 0,20 | 1,00 | 0,60 | 1,59 |
| 0,30 | 0,95 | 0,50 | 1,52 |
| 0,60 | 0,75 | 0,10 | 1,24 |
| 0,40 | 0,68 | 0,40 | 1,16 |
| 0,50 | 0,68 | 0,30 | 0,88 |

зв'язку загасання коливань і запасу стійкості. На другому етапі, що виконується on-line для поточного режиму, знаходиться коефіцієнт загасання і через нього – запас стійкості.

Для розрахованого після тестового збурення перехідного процесу зміни активної потужності по лінії застосовується перетворення Фур'є для двох рівних послідовних інтервалів і для основної (домінантної) гармоніки обчислюється коефіцієнт загасання коливань [1]: $K_3 = (A_2 - A_1) / (A_1 \cdot \Delta t_{21})$, де A_1 – амплітуда гармоніки для 1-го інтервалу; A_2 – амплітуда гармоніки для 2-го інтервалу; Δt_{21} – зміщення у часі 2-го інтервалу відносно 1-го.

Досягання порушення стійкості в процесі обважнення режиму дозволяє знайти граничну потужність контрольованої лінії $P_{гр}$ і по відношенню до неї обчислити коефіцієнт запасу стійкості по лінії в i -му режимі: $K_{pi} = (P_{гр} - P_i) / P_i$.

У результаті для вихідного і послідовно обважнених режимів ($i=0,1,2,\dots$) одержуємо послідовність пар $K_3 - K_p$, яку можна розглядати як певну функцію $K_p = f(K_3)$ і використати для визначення запасу стійкості K_p , коли відомий коефіцієнт загасання вільних коливань K_3 . Згадану функцію можна знайти, виконавши of-line, на етапі підготовки системи моніторингу, обважнення і відповідні розрахунки для ліній у контрольованому перетині у такій послідовності: розрахунок обважненого i -го режиму – розрахунок перехідного процесу після малого тестового збурення – визначення за допомогою перетворення Фур'є амплітуди основної гармоніки для двох послідовних інтервалів – обчислення коефіцієнта загасання коливань K_{3i} – обчислення запасу стійкості K_{pi} . Для моніторингу рівня стійкості on-line виконується оцінювання поточного стану за даними телеметрії (в ОЕС України виконується періодично з інтервалом 10 хвилин [3]), а далі та сама послідовність: розрахунок перехідного процесу – перетворення Фур'є – коефіцієнт загасання K_3 – запас стійкості з використанням функції $K_p = f(K_3)$.

Дослідження спектрів і запасу стійкості режимів перетину ОЕС–Київ. Забезпечення стійкості цього перетину є актуальною задачею для Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. Розрахункова схема має 716 вузлів, 60 генераторів.

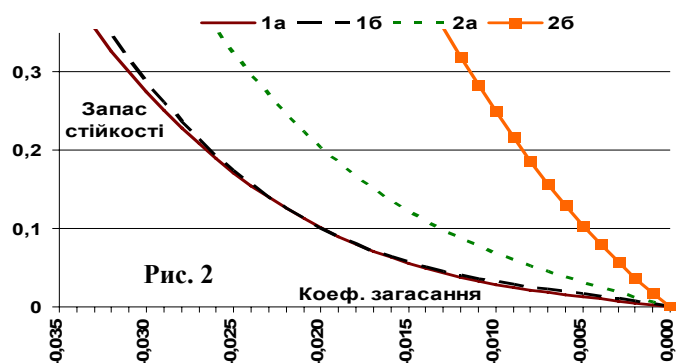
Розрахунки стійкості виконувалися для лінії 750 кВ ХАЕС–ЧАЕС для варіантів: (1а) – в ремонті лінія 330 кВ Шепетівка–Житомир, (1б) – в ремонті лінія 750 кВ Вінницька 750 кВ–Київська 750 кВ та для лінії 750 кВ Вінницька 750 кВ–Київська 750 кВ; для варіантів: (2а) – в ремонті лінія 330 кВ Шепетівка–Житомир, (2б) – в ремонті лінія 750 кВ ХАЕС–ЧАЕС. Для кожного з варіантів виконувалося обважнення режиму аж до досягнення режиму з порушенням стійкості ОЕС. За допомогою програмного комплексу АВР-84, створеного в Інституті електродинаміки НАН України, для вихідного та послідовно обважнених режимів виконувалися розрахунки електромеханічного перехідного процесу після малого збурення. Для того, щоб мати можливість порівняти результати розрахунків із зареєстрованим пристроєм «Регіна» реальним процесом коливань активної потужності по лінії ХАЕС–ЧАЕС, вид і амплітуда тестового збурення були вибрані як реально можливі, тобто вимикання навантаження 20 МВт на київській підстанції Октябрська.

У табл. 2 наведені розраховані шляхом перетворення Фур'є амплітудно-частотні спектри, а у табл. 3 – результати розрахунків K_3 , K_p для чотирьох варіантів стану перетину. Для кожного варіанта виконана апроксимація функції $K_p = f(K_3)$ степеневим поліномом другої або третьої степені і одержані такі функції: 1а: $K_p = -9782K_3^3 - 77,40K_3^2 - 2,68K_3$, 1б: $K_p = -13551K_3^3 - 220,48K_3^2 - 4,02K_3$,

2а: $K_p = -14500K_3^3 - 94,86K_3^2 - 6,30K_3$, 2б: $K_p = 839,08K_3^2 - 16,59K_3$, які показані на рис. 2.

| Режим f, А | Інтервал 1 | Інтервал 2 |
|---------------|---------------|---------------|
| | f, Гц/ А, МВт | f, Гц/ А, МВт |
| 1а | 0,60/ 2,78 | 0,60/ 2,22 |
| | 1,19/ 0,37 | 0,74/ 0,1 |
| | 0,74/ 0,17 | 1,19/ 0,09 |
| 1б | 0,59/ 11,19 | 0,59/ 9,65 |
| | 25,00/ 1,90 | 25,00/ 1,91 |
| 2а | 1,17/ 1,18 | 1,17/ 0,89 |
| | 0,59/ 25,88 | 0,59/ 20,9 |
| | 25,00/ 1,6 | 25,00/ 1,6 |
| | 0,74/ 1,13 | 0,74/ 0,73 |
| 2б | 0,56/ 9,52 | 0,56/ 9,29 |
| | 25,00/ 2,17 | 25,00/ 2,17 |
| | 1,12/ 1,10 | 1,12/ 1,58 |

Представлені графіки свідчать про те, що функція має індивідуальний характер для кожної лінії, яка вико-



ривіюється для контролю стійкості у перетині.

| Режим K_3 / K_{pi} | 0 | 1 | 2 | 3 | $P_{гр}$ |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| 1a | -0,0299/0,27 | -0,023/0,14 | -0,0176/0,01 | 0,0216/-0,09 | 967,01 |
| 1б | -0,0269/0,21 | -0,0222/0,13 | -0,01/0,03 | 0,0125/-0,06 | 901,78 |
| 2a | -0,028/0,43 | -0,017/0,15 | -0,007/0,04 | 0,016/-0,08 | 314,7 |
| 2б | -0,003/0,07 | 0,002/-0,03 | 0,030/-0,12 | 0,092/-0,20 | 605,24 |

З іншого боку, як показує порівняння 1a та 1б, для лінії, яка є визначальною для заданої траєкторії об'їзду, на цю функцію мало впливають

зміни режиму перетину аж до вимикання ліній у перетині. У цьому випадку в діапазоні $K_p=0...0,25$, функція $K_p=f(K_3)$ може бути використана для on-line моніторингу рівня стійкості енергосистеми.

Висновки. 1. Показано, що в спектрі реального процесу коливань потужності по лінії 750 кВ, який є наслідком численних малих випадкових збурень режиму з достатнім запасом стійкості, відсутня домінуюча гармоніка, яку можна використати для визначення рівня стійкості у перетині енергосистеми.

2. У реальних режимах ОЕС України запропоновано і досліджено методику моніторингу рівня статичної стійкості енергосистеми, яка ґрунтується на розрахунку з використанням перетворення Фур'є коефіцієнта загасання коливань потужності по лініях після малого тестового збурення поточного режиму, отриманого періодичним оцінюванням стану на основі телевимірювань.

3. Показано, що функція зв'язку коефіцієнта загасання коливань потужності K_3 і коефіцієнта запасу стійкості активної потужності контрольованої лінії K_p має індивідуальний характер для кожної лінії. З іншого боку, функція, що розрахована для лінії, яка є визначальною для заданої траєкторії об'їзду, мало залежить від зміни режиму перетину. Отже, вона може бути використана для on-line моніторингу рівня стійкості енергосистеми.

УДК 621.311.004.942

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТІ І МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

В.М.Авраменко, докт.техн.наук, **О.В.Мартинюк**, канд.техн.наук, **Т.М.Гурєва**

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: avr@ied.org.ua

Исследованы спектры колебаний мощности по линиям энергосистемы. Показано, что в спектре реального процесса колебаний мощности по линии 750 кВ отсутствует доминирующая гармоника. Предложена методика мониторинга уровня статической устойчивости энергосистемы, которая основывается на расчетах с использованием преобразования Фурье коэффициента K_3 затухания колебаний мощности по линиям после малого тестового возмущения. Показано, что функция связи коэффициента K_3 и коэффициента запаса устойчивости по линии K_p имеет индивидуальный характер для каждой линии и может быть использована для on-line мониторинга текущего уровня устойчивости энергосистемы. Библиограф. 5, табл. 3, рис. 2.

Ключевые слова: энергосистема, сечение, статическая устойчивость, мониторинг, свободные колебания, преобразование Фурье.

SPECTRAL ANALYSIS OF POWER OSCILLATIONS AND MONITORING METHOD OF GRID STEADY STATE STABILITY

V.N. Avramenko, **O.V. Martyniuk**, **T.M. Hurieieva**

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail: avr@ied.org.ua

The research method presents the calculations of the amplitude-frequency spectra of the power oscillations within the grid lines. It is shown that within the spectrum of the active power oscillations process along the 750 kV line, there is no dominant harmonic. The monitoring methodology of the grid steady state stability level based on the calculations, using the Fourier transform, of the power oscillations decay coefficient after a small test disturbance of the current state, obtained by the periodic state estimation, is proposed and researched at the real states of the UPS of Ukraine. It is shown that the connecting function of the power oscillations decay coefficient and the stability margin coefficient of the active power of the controlled line is individual for each line and can be used for the on-line monitoring of the grid stability. References 5, tables 3, figures 2.

Key words: electric power system, cross section, stability margin, monitoring, free oscillations, Fourier transform.

1. Avramenko V., Martyniuk A., Hurieieva T. Study of Amplitude-Frequency Spectra of Active Power through Power System Transmission Lines // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – № 3. – Pp. 47–51. (Ukr)

2. Kyrylenko O.V., Butkevych O.F., Rybina O.B. Low-frequency Oscillations of Interconnected Power Systems Mode Parameters and Prevention of Power System Failures // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2014. – Vypusk 38. – Pp. 30–39. (Ukr)

3. Prykhno V. Hierarchical principles of steady-state models formation based on telemetered information // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2006. – Part 1. – Pp. 22–27. (Ukr)

4. Ballance J., Bhargava B., Palayam P., Chen H., Hiebert J. Analysis of power systems oscillations in WECC system using synchro-phasor technology / CIGRE Session. – 2014. – C2–115.

5. Klein M., Rogers G.J., Kundur P. Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems // Transactions on Power Systems. – 1991. – Vol. 6. – No 3. – Pp. 914–921.

Надійшла 24.04.2015