

В. М. Авраменко¹
Н. Т. Юнєєва¹
Т. М. Гурєєва¹
А. О. Кришталь²

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВНОЇ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ У ПЕРЕТИНІ ОЕС УКРАЇНИ

¹ Інститут електродинаміки НАН України, Київ;

² Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Досліджено вплив на статичну стійкість ЕЕС регуляторів збудження синхронних генераторів. Наведено математичну модель, яка застосовується у Програмному комплексі аналізу стійкості складних ЕЕС розробки ІЕД НАН України для моделювання автоматичних регуляторів збудження (АРЗ). Дослідження виконано методом імітаційного моделювання, а саме, шляхом чисельних розрахунків електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС після малого скінченного збурення. Проведені дослідження на тестовій моделі перетину Захід–Вінниця показали, що невдале налаштування АРЗ може спричинити порушення стійкості у формі автоколивань потужності по лініях перетину, програмний комплекс ІЕД НАН України АВР-74 може бути використаний для дослідження коливної статичної стійкості енергетичних об'єднань.

Ключові слова: електроенергетична система, перетин, коливна статична стійкість, автоматичні регулятори збудження.

Вступ

Завдання підвищення стійкості Об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України має особливу актуальність з огляду на перспективу приєднання ОЕС України до європейського енергетичного об'єднання ENTSO-E. Для його вирішення потрібні досконалі програмні комплекси аналізу режимів електроенергетичних систем (ЕЕС), для верифікації яких використовуються тестові схеми. На такій схемі [1] виконано дослідження коливної статичної стійкості у перетині ОЕС України в залежності від налаштування автоматичних регуляторів збудження (АРЗ) синхронних машин. Порушення статичної стійкості великих енергосистем виникають внаслідок появи і зростання низькочастотних коливань потужності. В західних енергосистемах для вирішення цієї проблеми використовують спеціальні автоматичні стабілізатори потужності. Найбільшим джерелом впливу на стійкість ЕЕС є регулятори збудження синхронних генераторів. В Радянському Союзі протягом багатьох десятиліть для забезпечення стійкості ОЕС ефективно використовувались автоматичні регулятори збудження сильної дії (АРЗ-СД), які реагують не тільки на відхилення напруги і струму генератора, але й на похідні режимних параметрів. Такі регулятори і зараз функціонують на багатьох атомних і теплових електростанціях ОЕС України.

В Програмному комплексі аналізу стійкості складних ЕЕС розробки ІЕД НАН України [2] для моделювання АРЗ реалізована математична модель, яка дозволяє враховувати і АРЗ сильної дії, і так зване «високочастотне» АРЗ (регулювання за струмом ротора), і найпростіше струмове компанування. В параметрах АРЗ задається також тип системи збудження: незалежне збудження і самозбудження і передбачається врахування обмеження максимального струму ротора, яке виконують сучасні АРЗ, що може бути істотно для перевірки статичної стійкості динамічним методом, тобто шляхом розрахунку перехідного процесу за малих, але скінченних збурень.

Результати дослідження

Напруга збудження, що прикладається до обмотки ротора синхронної машини, створюється системою збудження. До її складу входять: збудник (електрична машина постійного струму; елект-

рична машина змінного струму з іонним або напівпровідниковим випрямлячем; перетворювач з трансформаторним джерелом живлення); автоматичний регулятор збудження (АРЗ); пристрої форсування збудження, роззбудження і гасіння поля; пристрої захисту ротора від перенапруг і перевантажень; апаратура контролю і автоматики Застосовувані на практиці типи систем збудження і АРЗ характеризуються великою різноманітністю. У Програмному комплексі аналізу стійкості складних ЕЕС розробки ІЕД НАН України система АРЗ описується двома диференційними рівняннями:

$$\frac{dU_f}{dt} = \frac{1}{T_g}(U_p - U_f); \quad (1)$$

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{T_p}(U_{p.vx} - U_p), \quad (2)$$

де T_g — постійна часу збудника; T_p — постійна часу регулятора.

У разі статичного (тиристорного) збудження задається $T_g = 0$, рівняння (1) не інтегрується, а напруга збудження $U_f = U_p$ з обмеженнями $U_{f \max}$, $U_{f \min}$.

Вхідний сигнал регулятора $U_{p.vx}$ передбачається комбінований, що дозволяє враховувати і АРЗ сильної дії, і так зване «високочастотне» АРЗ (регулювання за струмом ротора), і найпростіше струмове компаундування.

$$U_{p.vx} = U_{po} + b \frac{U_i - U_o}{U_{ном}} + b' \frac{U_i - U_{(i-1)}}{U_{ном} h_{пред}} + k'_{Ip} \frac{I_{fi} - I_{f(i-1)}}{E_{qном} h_{пред}} + k_f s_i 50 + k' \frac{s_i - s_{(i-1)}}{h_{пред}} 50 + k_{Ip} \frac{I_{fi}}{E_{qном}} + k_I \frac{I - I_o}{I_{ном}}.$$

В параметрах моделі РНД задається також тип системи збудження: СВ = 0 незалежне збудження і СВ = 1 самозбудження. У разі СВ = 1 з рівняння (1) при постановці в диференційні рівняння перехідних процесів синхронних машин множиться на коефіцієнт $U_{ген}/U_{гено}$.

У моделі РБД передбачається врахування обмеження максимального струму ротора, яке виконують сучасні АРЗ, що важливо для перевірки статичної стійкості динамічним методом, тобто шляхом розрахунку перехідного процесу за малих, але скінченних збуреннях. Для цього обчислюється струм ротора I_f (в масштабі ЕРС).

$$I_f = \psi_f - (x_d - x'_d) I_d \quad (\text{модель МОДК});$$

$$I_f = \frac{\psi_f - (x_d - x'_d) \left(1 - \frac{x_d - x'_{1d}}{x_{ad}} \right) I_d - \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \cdot \psi_{1d}}{1 - \frac{(x_d - x'_d)(x_d - x'_{1d})}{x_{ad}^2}} \quad (\text{модель М2ДК}).$$

Якщо $I_f > (I_{f \max} \cdot E_{qном})$, то із заданою затримкою часу $dt(I_{f \max})$ вводиться обмеження $U_{p.vx}$

$$U_{f(\max)} = I_{f \max} + \frac{T_{d0}}{E_{qном}} \frac{d\psi_f}{dt} \quad (\text{модель МОДК});$$

$$U_{f(\max)} = I_{f \max} \left(1 - \frac{(x_d - x'_d) \cdot (x_d - x'_{1d})}{x_{ad}^2} \right) + \frac{T_{d0}}{E_{qном}} \cdot \frac{d\psi_f}{dt} \quad (\text{модель М2ДК}).$$

Розрахунки електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС шляхом чисельного інтегрування нелінійних рівнянь динаміки системи за малого збурення дозволяють перевірити коливну стійкість ЕЕС з урахуванням усіх нелінійностей і обмежень. Проведено дослідження впливу параметрів налаштування АРЗ на коливну статичну стійкість в перетині Захід–Вінниця для тестової схеми, сформованої на режимі зимового максимуму ОЕС України. Схема складається з 51 вузла, 68 віток, 1 генераторів. Потужності по лініях досліджуваного перетину у доаварійному режимі показано на рис. 1.

Назва...	Состав	Перето...	Перето...	Ток ли...
	808-703 ХАЭС... -ЧАЭС750.	-1211.7	142.6	1011.7
	809-803 ХАЭС330. -ШЕПЕТОВ.	-81.3	18.0	143.0
	945-827 ЗУ 750 -ВН-750..	-996.4	421.4	931.6
	810-818 ХМЕЛЬНИЦ -БАР.....	-332.7	58.5	587.2
	905-821 ИВ.ФРАНК -ЧЕРНОВЦЫ	-376.7	89.1	698.1
Зап-Вин	803-712 ШЕПЕТОВ. -ЖИТОМИР.	-0.0	-0.0	0.0
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-560.5	-48.1	468.9
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-540.3	-47.2	452.1

Рис. 1. Потужності по лініях перетину Захід-Вінниця

Моделювання генераторів з пристроями АРЗ задано для трьох вузлів, які відповідають Рівненській і двом блокам Хмельницької АЕС. В якості збурення задано вимикання 5 % потужності навантаження на ПС Нивки. За стандартних параметрів налаштування АРЗ коливна статична стійкість порушується, що відображає результат розрахунку параметрів перехідного процесу (ковзання, напруга збудження, активна потужність) для генератора ХАЕС (рис. 2) і лінії 750 кВ ЧАЕС-ХАЕС (активна, реактивна потужність, струм) (рис. 3).

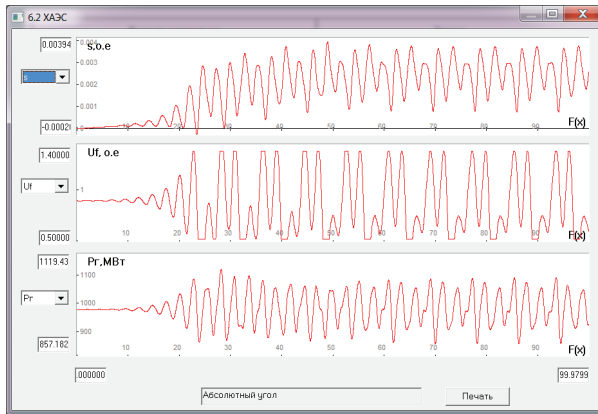


Рис. 2. Результати розрахунку режиму для блока № 2 ХАЕС за стандартного налаштування АРЗ

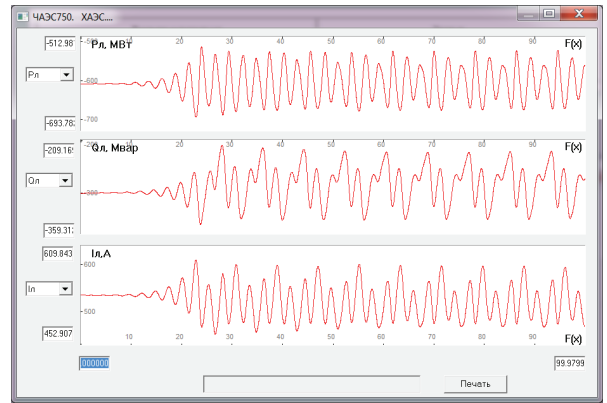


Рис. 3. Результати розрахунку режиму для лінії 750 кВ ЧАЕС-ХАЕС за стандартного налаштування АРЗ

Зі зміною коефіцієнта регулювання за відхиленням напруги з -21 до -10 стійкість зберігається (рис. 4, 5).

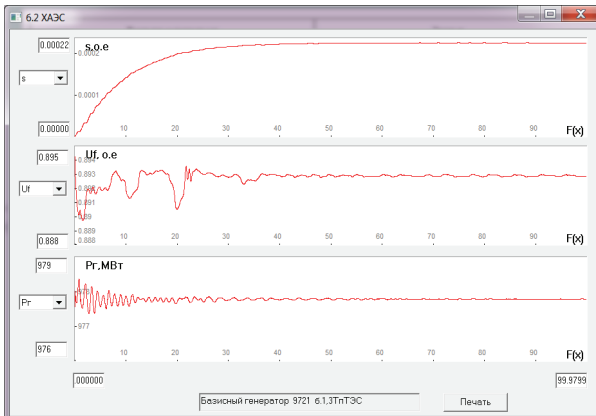


Рис. 4. Результати розрахунку режиму для блока № 2 ХАЕС при зміні коефіцієнта регулювання за відхиленням напруги АРЗ

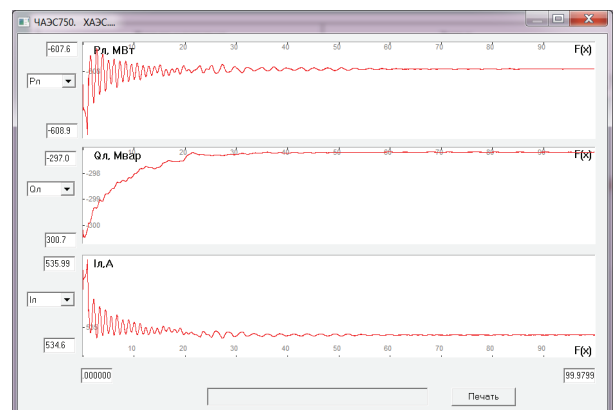


Рис. 5. Результати розрахунку режиму для ЛЕП 750 кВ ЧАЕС-ХАЕС при зміні коефіцієнта регулювання за відхиленням напруги АРЗ

Висновки

Проведені дослідження на тестовій моделі перетину Захід-Вінниця показали, що невелике налаштування АРЗ може спричинити порушення стійкості у формі автоколивань потужності по лініях перетину; Програмний комплекс ІЕД НАН України АВР-74 [3] може бути використаний для дослідження коливної статичної стійкості енергетичних об'єднань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Авраменко, Н. Юнеєва, Т. Гурєєва, и Н. Бабич, «Тестовая модель ОЭС для сравнения компьютерных моделей анализа устойчивости и живучести ОЭС Украины», *Електрические сети и системы*, № 4, с. 3-30, 2017.
- [2] В. Авраменко, В. Крылов, П. Черненко, и В. Прихно, *Математические модели и программные средства для решения задач автоматизированного диспетчерского управления энергосистемами*. Киев, Украина: Институт электродинамики НАН Украины. 2012, 303 с.
- [3] В. Авраменко Модели, методы и программные средства для расчета и анализа переходных режимов и устойчивости ЭЭС, *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць*. № 18. с. 12-26, 2007.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.01.2018

Авраменко Володимир Миколайович — д-р техн. наук, професор, провідний науковий співробітник, e-mail: avr@ied.org.ua ;

Юнеєва Наталія Тахірджанівна — канд. техн. наук, науковий співробітник;

Гурєєва Тетяна Михайлівна — провідний інженер-програміст.

Інститут електродинаміки НАН України, Київ;

Кришталь Анна Олександрівна — студентка Фізико-технічного інституту.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

V. M. Avramenko¹
N. T. Yunieieva¹
T. M. Hurieieva¹
A. O. Kryshstal²

Study of Oscillatory Steady State Stability in the Cross-Section of Power System of Ukraine

¹Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine

²National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute»

The task of increasing the stability of the United Energy System (UES) of Ukraine has a particular relevance in view of the prospect of joining the UES of Ukraine to the European energy association ENTSO-E. Modern software complexes of the analysis of modes of electric power systems (EPS), which use mathematical models of elements of the EPS, are required for the solution. The possibility of verification of models is complicated by the lack of naturally registered information on the violation of the stability of large energy connections due to the rarity of its cases. Therefore, for verification, calculations can be made using specially designed test schemes which reflect the properties of the researched EPS. Such scheme was used to study the oscillatory static stability at the intersection of the UES of Ukraine, depending on the setting of automatic excitation control (AEC) of synchronous generators.

The excitation voltage, which applied to the winding of the rotor of the synchronous machine, is created by the excitation system. It consists of: an excitation (an electrical direct current (DC) machine; an electric alternating current (AC) machine a semiconductor rectifier; a converter with transformer power supply); automatic excitation controller (AEC); devices for forcing the excitation, excitation and extinguishing of the field; devices for protecting the rotor from over voltages and overloads; control and automation equipment. In practice, the types of excitation systems and AECs are characterized by a large variety. In the Software complex of stability analysis of complex EPSs of the IED of the National Academy of Sciences of Ukraine, two models are used for AEC modeling: RCA (regulator of continuous action) and RB (relay boost). In the continuous action controller (CAC) model, the input signal of the controller is assumed to be combined, which allows to take into account both the AEC of strong action, and the so-called "high-frequency" AEC (current controller of the rotor), and the simplest current compaction. The parameters of the RND model also specify the type of excitation system: independent excitation and self-excitation. The RND model is envisaged to take into account the limitation of the maximum current of a rotor, which is performed by modern AEC. It can be significant in checking static stability by a dynamic method (by calculating the transition process for small but finite perturbations). The rotor current (on the scale of the EMF) is calculated for this.

The conducted research on the test model of the West-Vinnitsa crossing showed that the failure of the AEC setting could lead to a breakdown of stability in the form of self-oscillating power over the intersection lines; The software complex of the IED of the National Academy of Sciences of Ukraine AVR-74 can be used to study the oscillatory static stability of power associations.

Keywords: electric power system, the cross section, the oscillatory steady state stability, automatic excitation regulator.

Avramenko Volodymyr M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Research Fellow, e-mail: avr@ied.org.ua ;
Yunieieva Nataliia T. — Cand. Sc. (Eng.), Research Fellow, e-mail: untunt@ukr.net ;
Hurieieva Tetiana M. — Leading Engineer;
Kryshthal Anna O. — Student of Institute of Physics and Technology

В. Н. Авраменко¹
Н. Т. Юнеева¹
Т. М. Гуреева¹
А. А. Кришталь²

Исследование колебательной статической устойчивости в сечении ОЭС Украины

¹Институт электродинамики Национальной Академии наук Украины

²Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Исследовано влияние на статическую устойчивость ЭЭС регуляторов возбуждения синхронных генераторов. Приведена математическая модель, которая применяется в Программном комплексе анализа устойчивости сложных ЭЭС разработки ИЭД НАН Украины для моделирования автоматических регуляторов возбуждения (АРВ). Исследование выполнено методом имитационного моделирования, а именно, путем численных расчетов электромеханических переходных процессов в ЭЭС после малого конечного возмущения. Проведенные исследования на тестовой модели сечения Запад–Винница показали, что неудачная настройка АРВ может привести к нарушению устойчивости в форме автоколебаний мощности по линиям сечения; программный комплекс ИЭД НАН Украины АРВ-74 может быть использован для исследования колебательной статической устойчивости энергетических объединений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, сечение, колебательная статическая устойчивость, автоматические регуляторы возбуждения.

Авраменко Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: avr@ied.org.ua ;

Юнеева Наталия Тахирджановна — канд. техн. наук, научный сотрудник, e-mail: untunt@ukr.net ;

Гуреева Татьяна Михайловна — ведущий инженер;

Кришталь Анна Александровна — студент Физико-технического института