

## МОДЕЛЮВАННЯ ОБМЕЖУВАЧІВ МІНІМАЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ МАШИН ДЛЯ АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

© Коновал В. С., Козовий А. Б., 2015

Розглянуто аспекти моделювання сучасних систем збудження синхронних машин для аналізу стійкості електроенергетичних систем. Наведено особливості математичних моделей обмежувачів мінімального збудження та здійснено перевірку їх функціонування на прикладі реальних електростанцій.

*Ключові слова:* стійкість електроенергетичних систем, система збудження синхронної машини, регулятор збудження, системний стабілізатор, обмежувач мінімального збудження, математична модель, цифрова модель.

**This article surveys the modeling aspects of modern excitation systems for synchronous machines that is used to analyze power system stability. We presented peculiarities of under excitation limiter mathematical models and tested their performance for real power stations.**

*Key words:* power systems stability, synchronous machine excitation system, excitation regulator, system stabilizer, minimum excitation limiter, mathematical model, digital model.

### Вступ

Для детальних досліджень стійкості електроенергетичних систем необхідно точно моделювати поведінку синхронних машин. Це вимагає докладного опису поведінки їх систем збудження [1] під час і великих (важких порушень), і малих збурень. Однак на практиці важко використовувати детальні математичні моделі і синхронних машин, і їх систем збудження у зв'язку з відсутністю детальної інформації про параметри і про додаткові функції управління. Зазвичай порядок математичної моделі нижчий у зв'язку з неможливістю врахування всіх контурів регулювання і неврахування залежності функціонування регуляторів від частоти енергосистеми (що характерно для старих систем збудження). Такі спрощені моделі дійсні для режимів, в яких відхилення частоти є в межах 5 % від номінального значення. Їх не можна використовувати для дослідження режимів підсинхронних резонансів чи крутих коливань валів синхронних машин [2].

За останні роки в Україні відбувається доволі активна модернізація блоків на електричних станціях [3], що особливо проявляється в заміні старих систем збудження на нові, сучасні системи збудження провідних закордонних фірм-виробників АВВ (Швейцарія), АЕГ (Німеччина) тощо. Це вимагає кількісного та якісного оцінювання впливу процесу модернізації на роботу інших електростанцій зокрема та електроенергетичної системи України загалом [4, 5].

### Аналіз попередніх досліджень та публікацій

В останні роки у світі велику увагу під час аналізу стійкості електроенергетичних систем приділяють точнішому моделюванню систем збудження синхронних машин, а саме, врахуванню роботи обмежувачів струму збудження (обмежувачів перезбудження і недозбудження, OEL і UEL відповідно). Важливість цього підтверджена і затвердженням міжнародним стандартом IEEE Std 421.5™-2005 [6]. Наприклад, обмежувачі перезбудження (OEL) протягом багатьох років використовують як частину систем збудження, проте, лише недавно їх почали використовувати в

моделюванні динаміки енергосистем. Можливість лавини напруги в найважчих режимах енергосистем підвищує важливість моделювання цих обмежувачів під час дослідження умов стійкості системи, наслідком яких є робота машин за високих рівнів збудження протягом тривалого періоду, таких, як лавина напруги або секціонування системи під час аварії. Такі події, зазвичай, відбуваються протягом тривалого періоду часу, якщо порівнювати з моделюванням динамічної стійкості або стійкості системи за малих збурень.

### Постановка задачі

В енергосистемах, енергопостачальних компаніях, проектних організаціях України та Росії широко використовують програмний комплекс «ДАКАР Елекс» [7–9] для аналізу стійкості режимів роботи ЕЕС. Завданням дослідження є розроблення математичних моделей обмежувачів мінімального збудження для врахування їх у моделях сучасних систем збудження синхронних машин, реалізація цифрових моделей та тестування цих моделей на реальних об'єктах ЕЕС. Це дасть змогу спеціалістам енергосистем, електричних станцій, проектних організацій комплексно досліджувати стійкість режимів енергоблоків, електростанцій та ЕЕС загалом.

### Виклад основного матеріалу

На рис. 1 наведена загальна функціональна блок-схема системи збудження синхронної машини з різними підсистемами. До цих систем можуть входити: перетворювач напруги на виводах і компенсатор навантаження, елементи регулювання збудження, збудник і здебільшого стабілізатор енергосистеми (PSS). Також можна застосовувати додаткове релейне регулювання збудження.

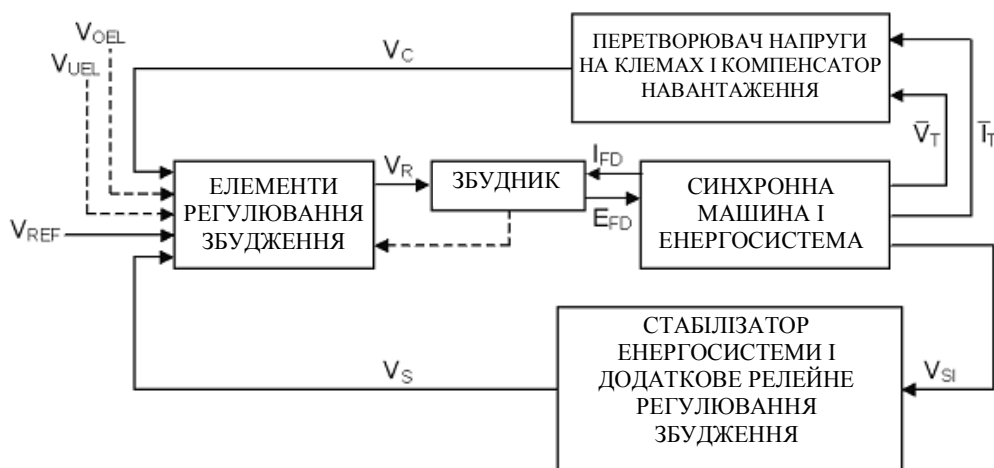


Рис. 1. Загальна функціональна блок-схема системи регулювання збудження синхронної машини

На рис. 1 прийнято такі позначення:  $V_{OEL}$  – вихідний сигнал обмежувача максимального збудження;  $V_{UEL}$  – вихідний сигнал обмежувача мінімального збудження;  $V_{REF}$  – еталонна напруга регулятора напруги (відповідає початковим умовам);  $V_C$  – вихідний сигнал блока перетворювача напруги на клеммах і компенсатора навантаження;  $V_R$  – вихідний сигнал регулятора збудження;  $V_S$  – вихідний сигнал (комбінований) стабілізатора енергосистеми і пристрою додаткового релейного регулювання збудження;  $V_T$  – напруга на виводах синхронної машини;  $I_T$  – струм синхронної машини;  $V_{SI}$  – вхідний сигнал стабілізатора енергосистеми;  $I_{FD}$  – струм збудження синхронної машини;  $E_{FD}$  – напруга збудження синхронної машини.

#### Обмежувачі недозбудження

Обмежувач недозбудження (UEL) призначений [10]:

- запобігти роботі, яка загрожує стійкості синхронної машини або може призвести до втрати синхронізації через недостатнє збудження;

- запобігти роботі, яка може призвести до перегрівання в частині статора синхронної машини, що, як правило, визначається за ділянкою найбільшого недозбудження характеристики машини;
- запобігти спрацюванню захисту від втрати збудження.

UEL зазвичай зчитують або комбінацію напруги і струму синхронної машини, або комбінацію активної і реактивної потужності. Вихід UEL подається в регулятор напруги або на суматор для додавання до нормального управління напругою, або до логічного елемента з великим значенням, щоб блокувати нормальний режим роботи регулятора напруги.

Хоча за конструкцією UEL є різного типу, їхні граничні характеристики зазвичай позначаються у вигляді активної і реактивної потужності в осях МВт і Мвар. Однак, здебільшого, заданий поріг у вигляді МВт і Мвар залежить від напруги на виводах, наприклад, як це відбувається з UEL, які зчитують реактивний опір на виводах генератора. У спробі охопити широкий діапазон застосувань UEL, було розроблено дві моделі UEL, а саме:

- модель з круговою характеристикою (тип UEL1);
- модель з одно- або багатосегментною лінійною характеристикою (тип UEL2).

Деякі UEL використовують функцію перекалібрування, за якої характеристика UEL зміщується залежно від температури або тиску охолоджувального газу в генераторі. Оскільки, зазвичай, це повільно діючий ефект, він не представлений в моделі UEL, і вона повинна відображати граничні характеристики початкового робочого режиму.

Вхід  $V_F$  (вихідна напруга стабілізатора системи збудження) до обох моделей дає змогу врахувати сигнал стабілізатора системи збудження від регулятора напруги, який можна використовувати для демпфування коливань. Крім того, функції затримки і випередження, представлені за допомогою постійних часу  $T_{U1}$ – $T_{U4}$ , можуть бути відповідно відрегульовані до певних значень, щоб забезпечити демпфування.

#### **Обмежувач недозбудження з круговою характеристикою (модель типу UEL1)**

Модель типу UEL1 (рис. 2) має кругове обмеження зони, яка подається у вигляді реактивної потужності порівняно з активною потужністю. Векторні виходи  $\bar{I}_T$  і  $\bar{V}_T$  – це вихідний струм і напруга на клеммах синхронної машини.

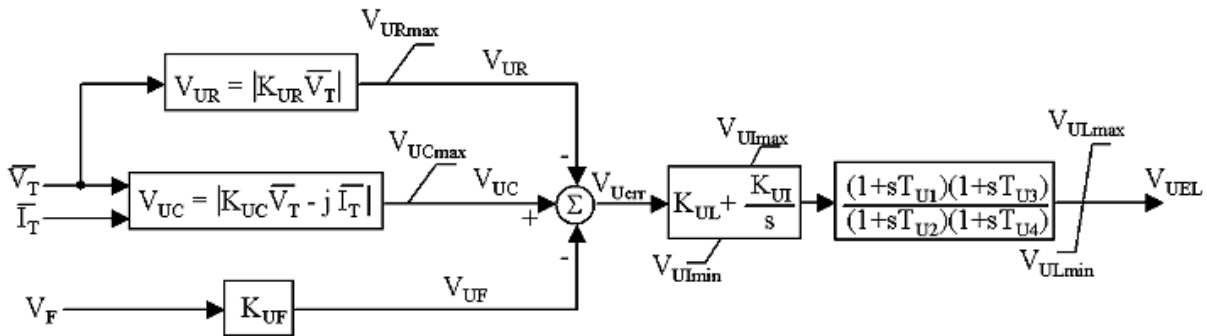


Рис. 2. Модель типу UEL1 – кругова характеристика обмежувача недозбудження

На рис. 3 зображено типову граничну характеристику UEL1, подану в осях Мвар і МВт.  $K_{UR}$  визначає радіус обмеження UEL так, що  $V_{UR}$  має наперед задану величину і також є пропорційним до величини вихідної напруги машини  $V_T$ .  $K_{UC}$  визначає центр характеристики UEL. Коли  $K_{UC}$ , помножене на векторну величину  $V_T$ , додається до векторної величини  $-jI_T$ , то отримане значення  $V_{UC}$  визначає чи досягла робоча точка машини поріг UEL. Споживання більшої кількості реактивної потужності ( $Q_T$ ) або видавання більшої кількості активної потужності ( $P_T$ ) збільшує  $V_{UC}$  і як наслідок, робоча точка зміщується у напрямку кругового порогу UEL.

Модель типу UEL1 вираховує робочу точку за допомогою  $I_T$  і порівнює її з радіусом і центром пропорційно до  $V_T$ , отже, використовує кругову характеристику опору. Оскільки захист

від втрати збудження генератора також часто використовують схожі кругові характеристики опору, то цей тип UEL дозволяє узгоджувати взаємодію з реле захисту від втрати збудження.

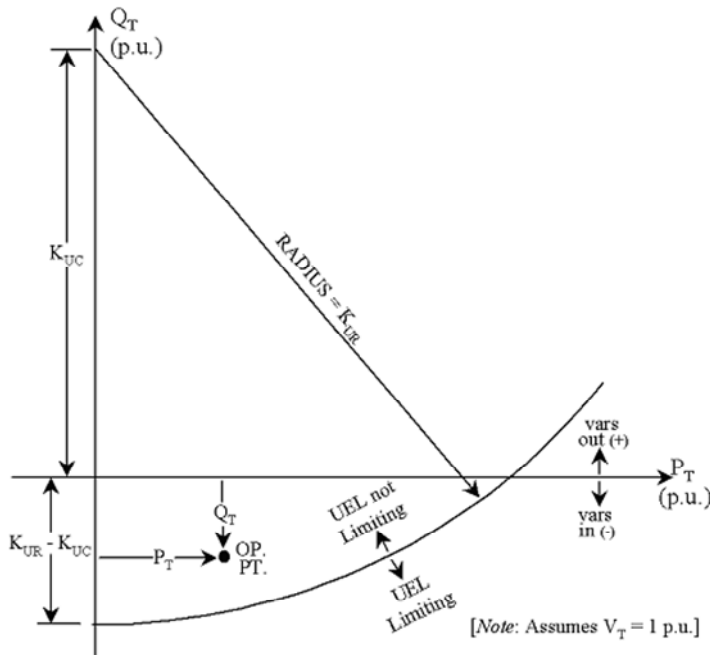


Рис. 3. Тип UEL1 з круговою граничною характеристикою

#### Кусково-лінійний обмежувач незбудження (модель типу UEL2)

На рис. 4 зображено модель типу UEL2. У цій моделі поріг UEL має або лінійну або багатосегментну характеристику для подавання у вигляді залежності вихідної реактивної потужності машини ( $Q_T$ ) від вихідної активної потужності машини ( $P_T$ ). Поріг UEL може не змінюватись під дією напруги на клеммах  $V_T$ , через встановлення експоненційних констант  $k_1=k_2=0$  (тоді  $F_1=F_2=1$ ). Якщо натомість UEL контролює активні і реактивні складові струму машини  $I_T$ , граничну характеристику UEL можна зробити пропорційною до  $V_T$ , використовуючи  $k_1=k_2=1$ . Аналогічно, якщо UEL налаштований на поріг, який ґрунтується на активних і реактивних складових реактивного опору на виводах машини, то граничну характеристику UEL можна зробити пропорційною до  $V_T^2$ , використовуючи  $k_1=k_2=2$ .

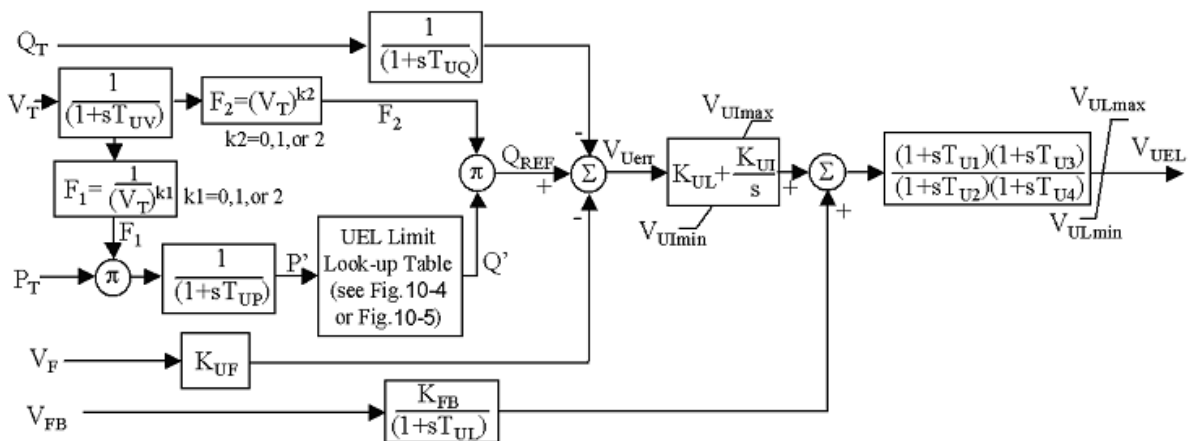


Рис. 4. Модель типу UEL2 – лінійний або багатосегментний обмежувач незбудження

У моделі UEL2 (рис. 4) після зміни активної потужності  $P_T$  за допомогою  $F_1$  (застосуванням відповідного впливу напруги на клеммах  $V_T$ ), за отриманим нормованим значенням  $P'$  визначається відповідна нормована величина реактивної потужності  $Q'$  в граничній характеристиці UEL.

Потім це нормоване граничне значення  $Q'$  множиться на  $F_2$ , щоб визначити граничну точку UEL  $Q_{REF}$ , яка порівнюється з реактивною потужністю машини  $Q_T$ . Гранична характеристика UEL (табл. 1) використовує нормовані значення активної і реактивної потужності ( $P'$  і  $Q'$ ), які дійсні для номінальної напруги на клемі ( $V_T = 1.0$  в.о.). Функції  $F_1$  і  $F_2$  забезпечують відповідні корективи, так що вплив напруги на клемі, якщо такий є, на ліміт UEL належно враховується.

На рис. 5 подано нормовану граничну характеристику UEL, яка складається з однієї прямої лінії. Коли розраховані точки  $(P_0, Q_0)$  і  $(P_1, Q_1)$ , вони визначають дві точки на лінійній характеристиці UEL. На рис. 5 ці точки розташовані на перетинах з осями  $P'$  і  $Q'$ , так що  $P_0 = 0$  і  $Q_1 = 0$ , але ці точки не потрібно буде визначати таким способом. Величини  $P$  і  $Q$ , використані для розрахунку порогу UEL, це ті величини, які будуть використані в  $V_T = 1.0$  в.о. Для будь-якого значення  $P'$ , можна легко визначити відповідне значення  $Q'$  за допомогою лінійної інтерполяції.

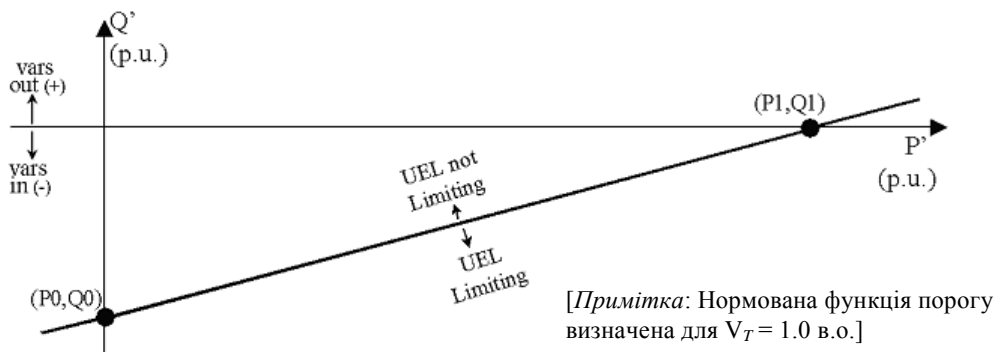


Рис. 5. Тип UEL2 з нормованою лінійною граничною характеристикою

На рис. 6 подано граничну характеристику для UEL, в якій обмеження складається з шести лінійних сегментів, хоча деякі системи можуть використовувати більшу або меншу кількість сегментів. Характеристика UEL визначається за допомогою визначення кінцевих точок кожного з сегментів у вигляді значень  $P$  і  $Q$  (для  $V_T = 1.0$  в.о.). Характеристика UEL може складатись з будь-якої кількості лінійних сегментів: від 1 до 6. Вимоги до даних для визначення характеристики UEL відносно кількості сегментів UEL наведено в табл. 1.

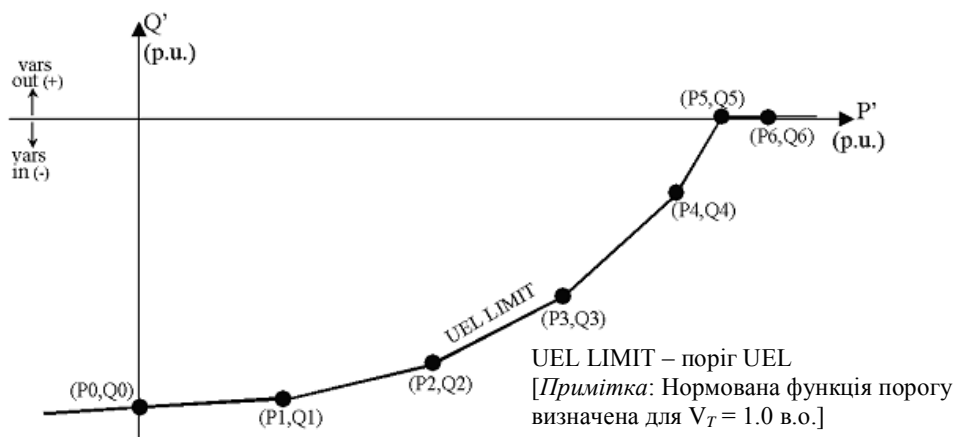


Рис. 6. Приклад типу UEL2 багатосегментної нормованої граничної характеристики з використанням шести сегментів

Між зазначеними кінцевими точками сегментів, характеристика UEL визначається прямою лінією. Для будь-якого значення  $P'$ , можна легко визначити відповідне значення  $Q'$  за допомогою лінійної інтерполяції. Характеристика UEL поза кожною визначеною кінцевою точкою – це пряма

лінія, що є продовженням сегменту визначеного двома першими (для від'ємних значень  $P$ ) або двома останніми (для додатних значень  $P$ ) кінцевими точками. Наприклад, на рис. 6 характеристика UEL для від'ємних значень  $P$  – це видовження сегмента, визначеного точками  $(P_0, Q_0)$  і  $(P_1, Q_1)$ . Також на цьому прикладі можна побачити, що за точкою  $(P_5, Q_5)$  поріг UEL, який продовжується вздовж осі  $Q' = 0$ , можна подати таким визначенням точки  $(P_6, Q_6)$ , що  $Q_5=Q_6=0$  і  $P_6>P_5$ . Якби точка  $(P_6, Q_6)$  не була визначена у цьому прикладі, то характеристика UEL продовжувалась би праворуч догори з таким самим нахилом, що і лінія сегменту, визначеного точками  $(P_4, Q_4)$  і  $(P_5, Q_5)$ .

Таблиця 1

**Вимоги до даних для визначення характеристики UEL відносно кількості сегментів**

Необхідні значення кінцевих точок	Кількість сегментів UEL					
	1	2	3	4	5	6
$P_0, Q_0$	X	X	X	X	X	X
$P_1, Q_1$	X	X	X	X	X	X
$P_2, Q_2$		X	X	X	X	X
$P_3, Q_3$			X	X	X	X
$P_4, Q_4$				X	X	X
$P_5, Q_5$					X	X
$P_6, Q_6$						X

За нормальних умов, коли UEL не обмежує, сигнал помилки  $V_{Uerr}$  (рис. 4), від'ємний, оскільки реактивна потужність  $Q_T$  буде вищою, ніж граничне значення  $Q_{REF}$ . В умовах перевищення порогу UEL,  $V_{Uerr}$  стає додатним, а значить додатною буде і вихідна потужність UEL. За достатньо великого значення вихідної потужності UEL розпочне управляти регулятором напруги, щоб збільшити збудження для переведення робочої точки назад до межі UEL.

**Тестування математичної моделі обмежувача мінімального збудження**

Перевіримо (погодження) наявних та рекомендованих характеристик обмеження мінімального збудження з характеристикою захисту від втрати збудження. Для прикладу розглянемо роботу блоків обмеження мінімального збудження, встановлених на енергоблоках Рівненської АЕС. На турбогенераторах № 1–4 для захисту від втрати збудження та захисту від симетричних КЗ встановлено дистанційний захист на базі реле КРС-2 з такими уставками:  $Z_1=1,73$  Ом; кут максимальної чутливості  $\varphi=260^\circ$ ; зміщення  $Z_{zm}=0,08$  %.

Характеристика блока обмеження мінімального збудження турбогенератора № 3 РАЕС наведена в табл. 2.

Таблиця 2

**Характеристика ОМЗ ТГ-3 РАЕС**

ТГ-3	$P$ , МВт	220	120	60	0
	$Q$ , Мвар	-5	-50	-60	-70

Для перевірки роботи блока обмеження мінімального збудження змодельюємо аварійну ситуацію – вимкнення шунтувальних реакторів 750 кВ на підстанції Західно-Українська та підвищення напруги в енергосистемі. На рис. 7 показані часові залежності реактивної потужності енергоблоків РАЕС після вимкнення на 1 с реактора 750 кВ (на одному з енергоблоків не враховано дію обмежувача мінімального збудження).

Перевіримо погодження наявних характеристик обмеження мінімального збудження з характеристиками захисту від втрати збудження. На рис. 8 зображено годограф динамічного опору генератора ТГ-3 РАЕС під час перехідного процесу, пов'язаного з підвищенням напруги в енергосистемі (вимкнення шунтувальних реакторів 750 кВ на підстанції Західно-Українська) та характеристику реле опору КРС-2.

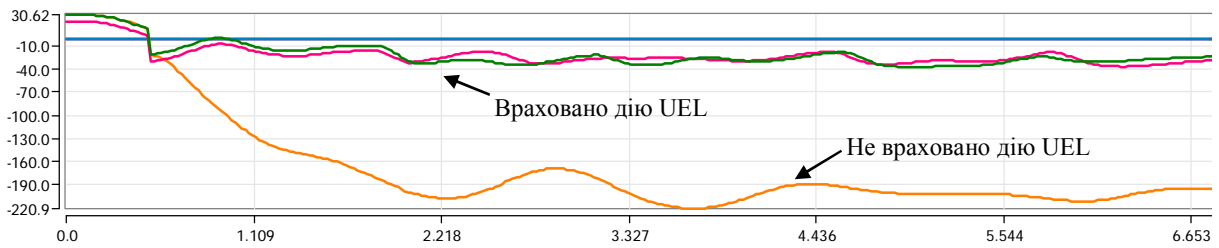
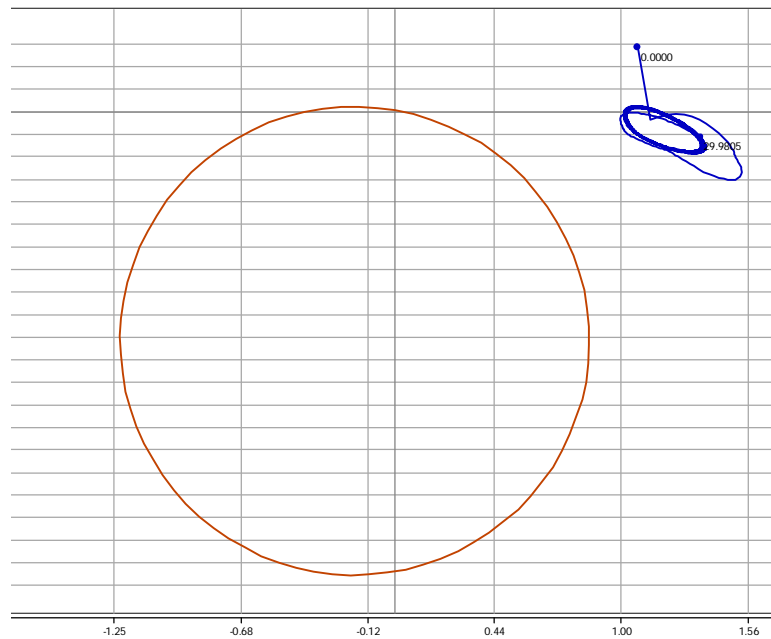


Рис. 7. Часові залежності реактивної потужності енергоблоків РАЕС після вимкнення реактора 750 кВ на 1 с з/без врахування дії UEL

Рис. 8. Годограф динамічного опору генератора ТГ-3 під час вимкнення реакторів 750 кВ на підстанції Західно-українська з характеристикою захисту від втрати збудження



Як видно з рис. 8 захист від втрати збудження не спрацьовує під час цього перехідного процесу в енергосистемі.

Змодельємо аварійну ситуацію з втратою збудження генератора ТГ-3 та перевіримо умови спрацювання відповідного захисту (рис. 9).

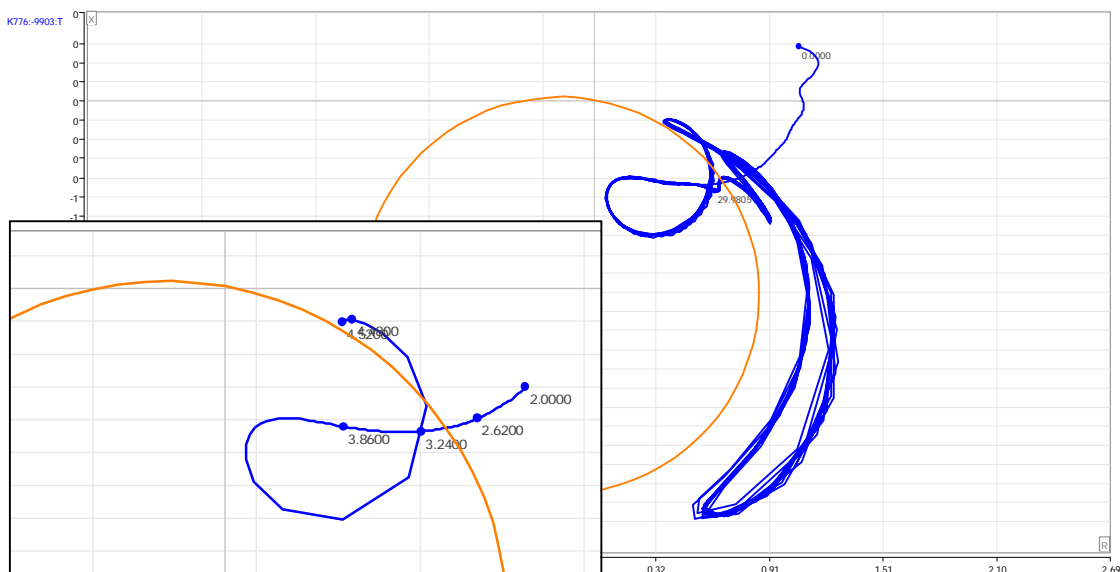


Рис. 9. Годограф динамічного опору генератора ТГ-3 та характеристики реле опору КРС-2 під час втрати збудження генератором

Як видно з рис. 9 під час виникнення аварійної ситуації, пов'язаної з втратою збудження, відповідний захист (на реле КРС-2) правильно відпрацює та вимкне генератор від енергосистеми.

### Висновки

1. Розроблено математичні моделі та реалізовано цифрові моделі двох типів обмежувачів мінімального збудження синхронних машин UEL1 та UEL2, що вперше в Україні дало змогу детально проаналізувати стійкість роботи електричних станцій та електроенергетичної системи загалом.

2. На прикладі реальних характеристик обмежувачів мінімального збудження генераторів Рівненської АЕС перевірили роботу блоків UEL в післяаварійних режимах, пов'язаних з небезпечним підвищенням рівнів напруг у мережі. Перевірено узгодження характеристик спрацювання блоків обмеження мінімального збудження з характеристиками захистів від втрати збудження генераторів ПАЕС.

1. Byerly R. T., Kimbark E. W., Ed. *Stability of Large Electric Power Systems*. New York: IEEE Press, 1974. 2. IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power Systems Stability Studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, pp. 494–509, February 1981. 3. План реконструкції і модернізації теплоелектростанцій і теплоелектроцентралей в період до 2020 року. – Розпорядження Кабінету Міністрів України. – № 648-р від 8.09.04р. 4. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. СОУ-Н МЕНВ 40.1-00100227-68:2012. – К.: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2012. – 29 с. 5. Типове технічне завдання на проектування реконструкції (технічного переоснащення) енергоблоків ТЕС, АЕС, ГАЕС, ГЕС та ТЕЦ, що працюють в ОЕС України. – 7.05.2014 р. 6. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Std 421.5™-2005. 7. [www.dakar.eleks.com](http://www.dakar.eleks.com) 8. Скрипник О. І. ДАКАР – комплекс програм для дослідження режимів роботи інтелектуальних енергетичних систем / О. І. Скрипник, В.С. Коновал, А.Б. Козовий, Т.О. Товстяк // *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск*. – К., 2011. – С. 56–64. 9. Konoval V. Power system dynamic stability: impact analysis of synchronous generator excitation system replacement / Volodymyr Konoval, Andriy Kozovyy, Oleksiy Skrypnyk, Andriy Kuchynskyi, Petro Dembitskyi // *Blackout a krajowy system elektroenergetyczny* (2014). – Poznan. – 2014. – P. 349-359. 10. Berube G.R., Hajagos L.M., Beaulieu R.E. "A Utility Perspective on Under-Excitation Limiters," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 3, pp. 532–537, September 1995.