

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ

Марченко А.А., к.т.н., доцент, Наухацька Т.А., магістрант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. Необхідність регулювання напруги в енергосистемі визначається як енергосистемою, так і споживачами. Системні вимоги до рівня напруги в мережах вищої напруги диктуються стійкістю паралельної роботи енергосистем.

Регулятори повинні ефективно працювати не тільки в нормальних, але й в аварійних режимах, тривалість яких зазвичай не перевищує декількох секунд і навіть частини секунди. Ці задачі здатні виконувати лише швидкодіючі електричні регулятори неперервної дії. Розрізняють регулятор напруги і регулятор збудження. Регулятор напруги підтримує напругу на виводах генератора шляхом дії на його збудження. У випадку необхідності регулювання збудження для підвищення стійкості паралельної роботи енергосистем, підвищення чіткості дії релейного захисту, забезпечення самозапуску двигунів і т.д., функції, які покладаються на регулятор, розширюються і його прийнято називати регулятором збудження [1].

Мета роботи. Метою даної статті є дослідження моделі статичної системи збудження в програмному середовищі Matlab/Simulink і аналіз впливу її параметрів на стан енергосистеми з метою підвищення ефективності регулювання напруги.

Матеріали та результати досліджень. Для зміни напруги на виводах синхронного генератора необхідно впливати на його збудження: при збільшенні збудження напруга підвищується, при зменшенні – знижується. Збудження можна регулювати вручну і автоматично. На рис. 1, а показана функціональна схема автоматичного регулювання напруги генератора. В склад схеми входить сам об'єкт регулювання – генератор з системою збудження і регулятор напруги. Разом регулятор і об'єкт складають систему автоматичного регулювання (САР).

В свою чергу регулятор складається з вимірювального, підсилювального і виконавчого елементів. На вхід вимірювального елемента подаються задана напруга U_0 , яка повинна підтримуватись на генераторі, і фактична напруги генератора U (останнє дозволяє замкнути систему регулювання). Фактична напруга U діє зустрічно з заданою напругою U_0 , внаслідок чого в вимірювальному елементі відбувається вимірювання різниці цих напруг. При відхиленні фактичної напруги генератора від заданої вимірювальний елемент подає вплив через підсилювальний і виконавчий елементи на систему збудження. Відбувається корекція збудження, і напруга генератора відновлюється до заданого значення.

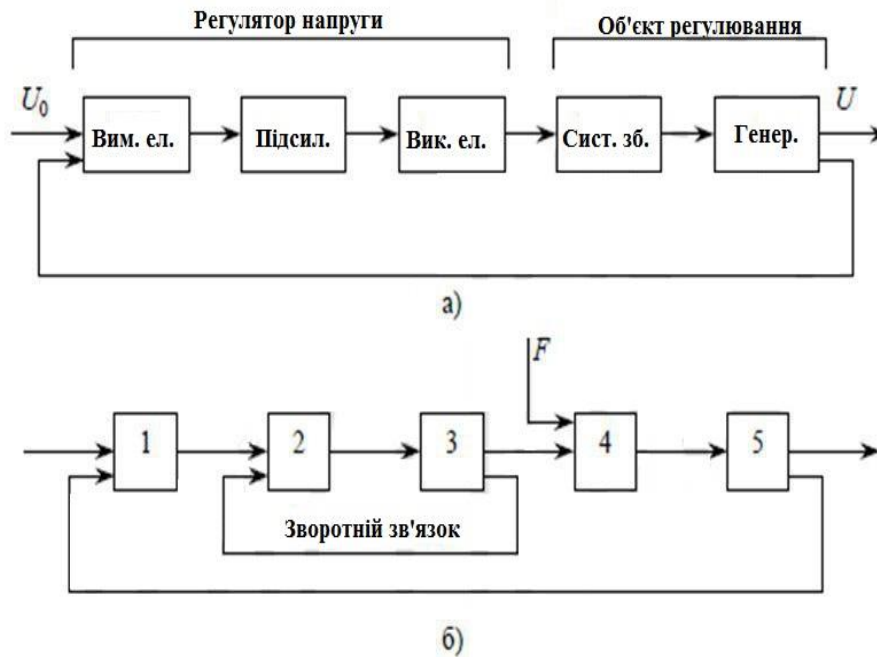


Рисунок 1 – функціональна (а) і структурна (б) схеми регулювання напруги

На рис. 1, б показана структурна схема САР напруги генератора. На структурній схемі можуть бути представлені і інші зв'язки елементів, які не вказані на функціональній схемі, але є вагомими для аналізу і налаштування генератора. До таких зв'язків відносяться зворотній зв'язок, яка охоплює елементи 2 і 3, а також місце прикладення зовнішнього збурення F . На приведеному рисунку вказані номери елементів. В відповідності до цієї нумерації повинні бути приведені рівняння елементів або їх передаточні функції [1].

Для дослідження системи збудження необхідно створити модель в склад якої входить набір певних елементів.

Для моделювання загальної системи було обрано блок, який буде представляти генератор (рис.3(1)). Синхронний генератор є моделлю класичної синхронної машини з демпферною обмоткою [2].

Виходи моделі A , B і C є виводами обмотки статора машини. На вихідному порту m формується векторний сигнал, що складається з 16 елементів. У даному випадку на вихід m виведено проекції струмів статора на осі q і d , напругу на терміналі і струм збудження. Напругу на терміналі отримано через проекції струмів статора на осі q і d через вираз:

$$V_T = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}.$$

Сигнал рівний механічній потужності на валу машини подається на вхідний порт P_m , а на вхідний порт V_f подається сигнал, що задає напругу обмотки збудження. Оскільки синхронна машина працює як генератор, то P_m має бути додатнім і дорівнювати активній потужності системи [3, 4].

Моделювання досліджуваної системи збудження було засноване на моделях, згідно IEEE, зокрема на статичній системі збудження типу ST1A, фундаментальний блок якої представлено на рис. 3(2).

Блок є моделлю системи збудження для синхронної машини і дозволяє регулювати напругу на затискачах синхронної машини, що працює в генераторному режимі. Основними елементами системи збудження (рис. 2) є регулятор напруги і збудник [3, 4, 5, 6].

На перший вхід блоку (V_{ref}) подається необхідне значення напруги на затискачах статора. На другий (V_t) вхід подаються поточні значення проєкцій напруг статора на осі q і d. На третій вхід (I_{fd}) подається вимірюване значення поточного поля статора керованого блоку синхронного генератора. Четвертий вхід може бути використаний для створення контуру стабілізації потужності машини. Всі вхідні змінні і вихідна змінна мають розмірність відносних одиниць (p.u.). Напруга поля (E_{fd}) подається до входу V_f блоку синхронної машини [8, 9].

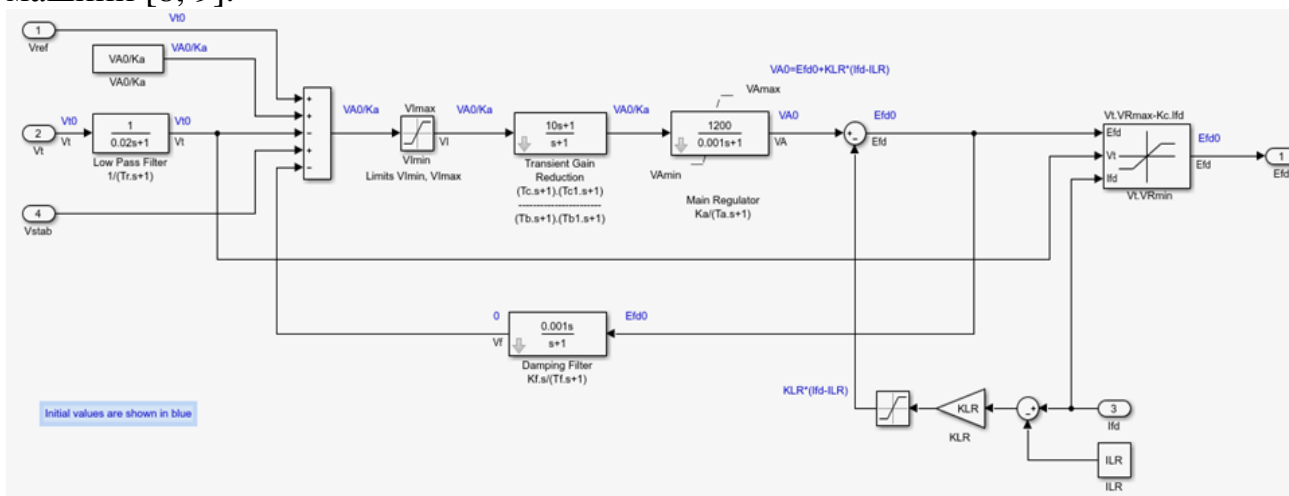


Рисунок 2 – Структурна схема системи збудження ST1A

Передаточні функції системи збудження представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Передаточні функції системи збудження [3, 4]

Складові системи збудження	Передаточна функція
Вхідний низькочастотний фільтр (Low Pass Filter)	$\frac{1}{T_r s + 1}$
Головний регулятор (Main Regulation)	$\frac{K_a}{T_a s + 1}$
Похідний зворотній зв'язок (демпфуючий контур) (Damping filter)	$\frac{K_f}{T_f s + 1}$
Кратність форсування-розфорсування (Transient gain reduction)	$\frac{(T_c s + 1) \cdot (T_{c1} s + 1)}{(T_b s + 1) \cdot (T_{b1} s + 1)}$

На рис. 3(3) представлено блок, який моделює трифазний пристрій включення і виключення змінного струму. Складається з трьох блоків Breaker, які керуються одним сигналом [3, 4].

На рис. 3(4) представлено блок, який моделює трифазний ланцюг, що складається з трьох послідовних RLC-навантажень. Схема з'єднання ланцюгів - зірка з заземленою нейтраллю. Параметри ланцюга задаються через потужності фаз ланцюга при номінальній напрузі і частоті [3, 4].

Аналізуючи важливість системи збудження для роботи синхронного генератора і електричних систем в цілому є необхідним проведення ряду дослідів, які дають оцінити характеристики системи збудження, використовуючи програмне забезпечення Matlab/Simulink. В результаті створення елементів в програмному середовищі Matlab/Simulink для побудови системи управління збудження синхронного генератора було розроблено ізолювану модель для дослідження.

Рівень точності дослідження залежить від оптимальних значень параметрів та динамічних моделей, що описують блоки, які входять до складу системи. Проблема полягає в тому, що найчастіше параметри реальної системи невідомі, тому моделі, які використовуються в планувальних та експлуатаційних дослідженнях не можуть відобразити справжньої картини [10].

Тому для вирішення даного питання необхідно провести дослідження ізолюваної системи, яка складається з системи збудження, генератора, навантаження та вимикача (рис. 3) з метою встановлення оптимальних параметрів системи збудження.

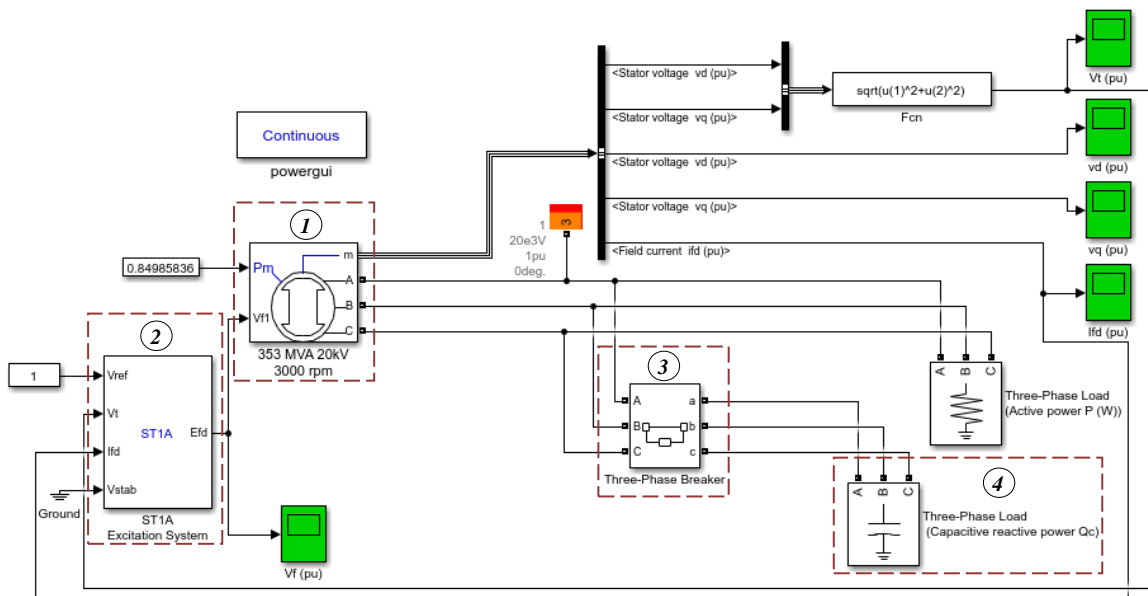


Рисунок 3 – Модель роботи генератора на ізолюване навантаження

Зміна параметрів системи збудження з метою пошуку оптимальних значень для найкращого відпрацювання системи:

K_i – зміна параметру K_f – коефіцієнту підйому фільтра похідного зворотнього зв'язку (рис. 4):

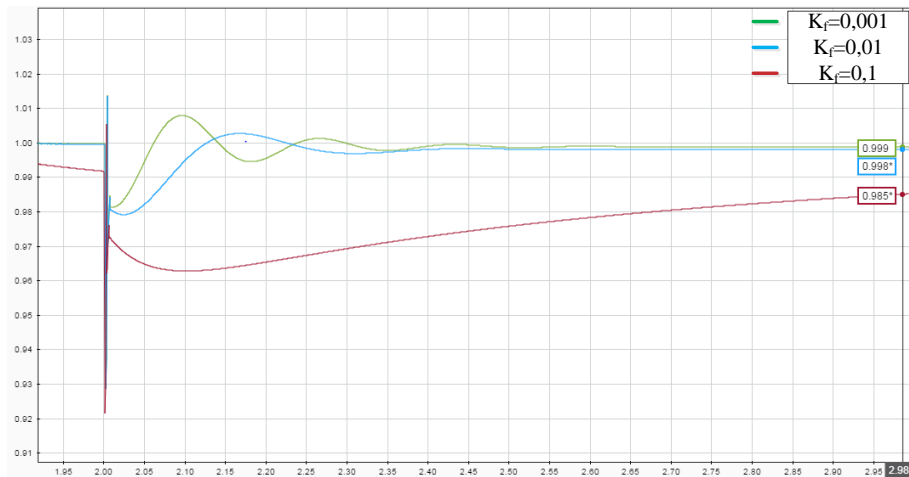


Рисунок 4 – Зміна напруги на терміналі при різних коефіцієнтах K_f – зміна параметру K_a – коефіцієнту підсилювача головного регулятора (рис. 5):

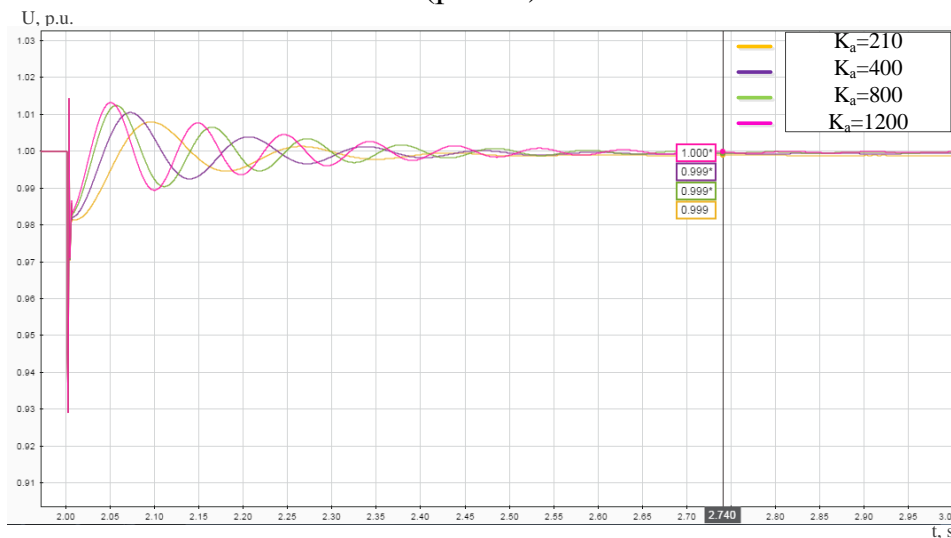


Рисунок 5 – Зміна напруги на терміналі при різних коефіцієнтах K_a – зміна параметру T_a – постійної часу головного регулятора (рис. 6):

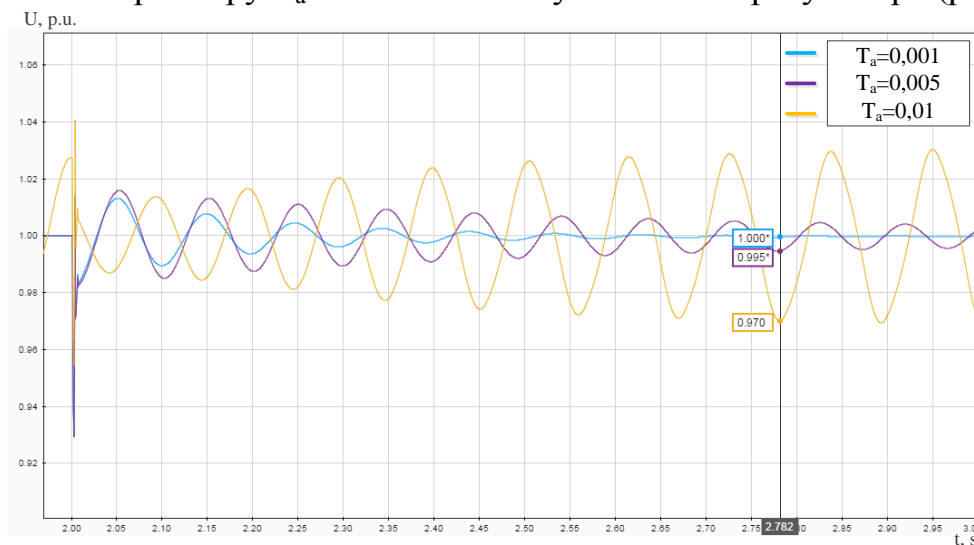


Рисунок 6 – Зміна напруги на терміналі при різних коефіцієнтах T_a – зміна параметру T_f – постійної часу похідного зворотнього зв'язку (рис. 7):

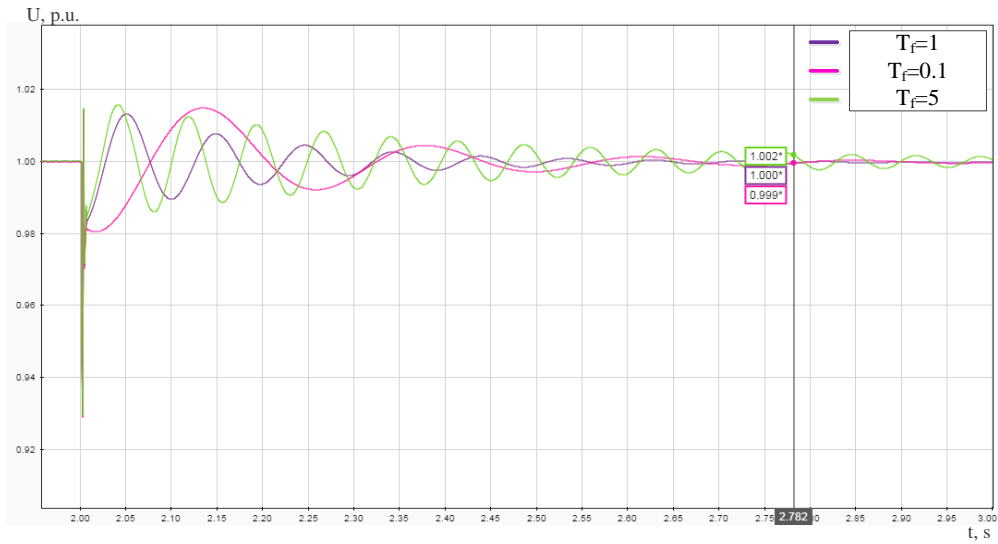


Рисунок 7 – Зміна напруги на терміналі при різних коефіцієнтах T_f – зміна параметрів T_b і T_c – постійних часу перехідного коефіцієнту підсилення (рис. 8):

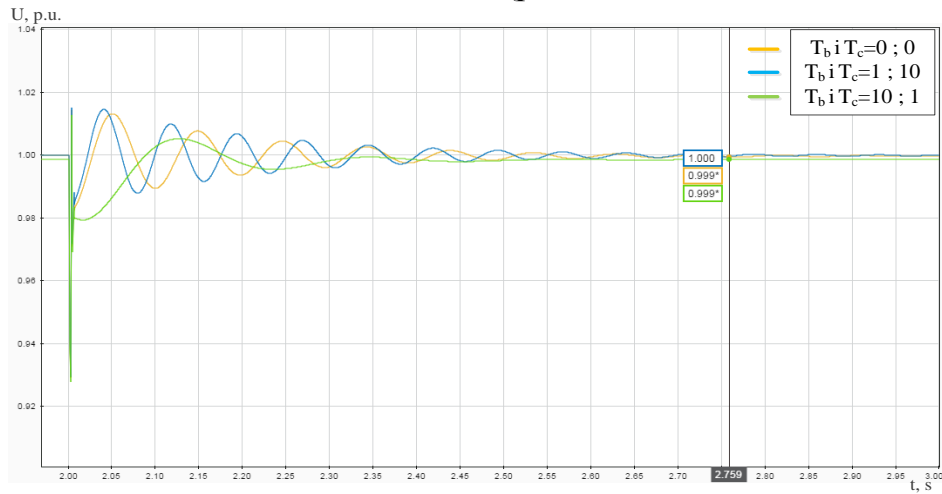


Рисунок 8 – Зміна напруги на терміналі при різних коефіцієнтах T_b і T_c – зміна параметрів VR_{min} і VR_{max} – вихідних обмежувачів регулятора напруги (рис. 9):

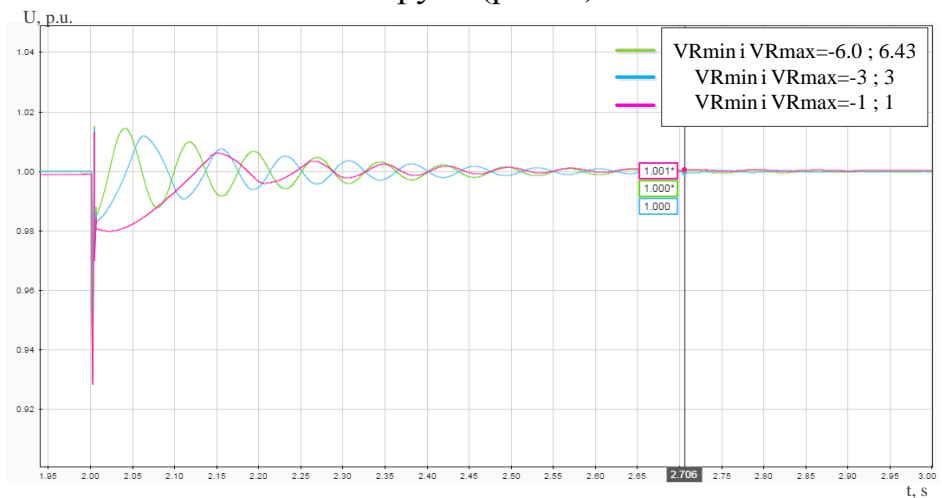


Рисунок 9 – Зміна напруги на терміналі при різних коефіцієнтах VR_{min} , VR_{max} – зміна параметрів V_{min} і V_{max} – вхідних обмежувачів регулятора напруги (рис. 10):

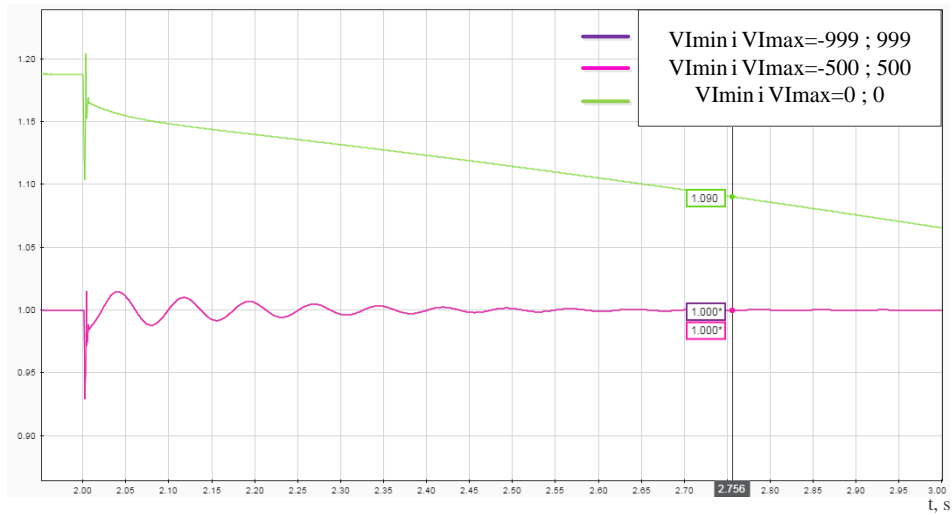


Рисунок 10 – Зміна напруги на термінали при різних коефіцієнтах V_{imin} , V_{imax}

Зміна інших параметрів не впливає на результуючі графіки. Аналіз отриманих результатів представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Аналіз проведеного моделювання по зміні параметрів системи збудження

Параметр	Значення за результатами моделювання	Обране оптимальне значення
K_f	0,001 0,01 0,1	0,01
K_a	210 400 800 1200	210
T_a	0,001 0,005 0,01	0,001
T_f	1 0,1 5	0,1
T_b і T_c	0;0 1;10 10;1	10;1
VR_{min} і VR_{max}	-6,0; 6,43 -3;3 -1;1	-1; 1
V_{imin} і V_{imax}	-999; 999 -500;500 0;0	-999; 999

Отримані оптимальні значення були обрані з дотриманням критеріїв якості перехідного процесу (перерегулювання, час перехідного процесу, інтегральний квадратичний критерій для коливальних і аперіодичних систем), та можуть використовуватися для подальшого моделювання.

Висновки: На основі створення окремих елементів в програмному середовищі Matlab/Simulink, побудовано модель системи управління збудженням синхронного генератора.

Дослідження показали, що рівень точності моделювання залежить від оптимальних значень параметрів елементів досліджуваної системи збудження ST1A. Аналіз впливу зміни окремих параметрів на систему в цілому, дозволив визначити оптимальні параметри системи збудження спираючись на критерії якості перехідного процесу. Результати досліджень можуть бути використані при розробці та налаштуванні систем регулювання напруги.

Перелік посилань

1. Павлов Г.М. Автоматика энергосистем / Г.М. Павлов, Г.В. Меркурьев - СПб.: Центр подготовки кадров РАО "ЕЭС России", 2001. – с. 106-183
2. Призначення генератора [Електронний ресурс]. - Режим доступу : URL : <http://vmest.ru/nuda/dokumentaciyi-konkursnih-torgiv-na-zakupivlyu-robit-z-starobes/stranica-43.html>. – Назва з екрана.
3. Черных И.В. моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных – М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. – 288с.
4. Simscape Power Systems Simscape Blocks [Electronic Resource]. – Mode of access : URL : <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/simscapeblocklist.html>. – Title from the screen.
5. Марченко А.А., Наухацька Т.А. Оптимізація параметрів рід-контролера системи збудження генератора. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» [Електронний ресурс] – 2017. – С.76-82. – Режим доступу <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/129888/125503>
6. Теория автоматического управления в среде MATLAB: учеб. пособие / В. И. Будин, Ф. В. Дремов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 127 с.: ил. 36, табл. 7. Библиогр.: 9 назв.
7. Системы возбуждения мощных синхронных генераторов и компенсаторов. Учебно-методическое пособие. – М. : ВИПКэнерго, 1990. – 67с.
8. Функциональное описание UNITROL 6800 / Static excitation systems,. – Switzerland : ABB Ltd, 2009. – 115с.
9. A. Burmistrov, E. Popov, A. Urganov, A. Gerasimov e A. Esipovich, “Estimation of efficiency of modern excitation controllers of synchronous machines in the conditions of physical model of a complex system and suggestion of estimation technique and criteria as an addition to the IEC standard,” em 44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 2012.
10. “IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), 21 April 2006.
11. J. Lai, “Parameter Estimation of Excitation Systems,” Master’s thesis, Raleigh, North Carolina, 2007.