

УДК 621.314

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ЗАСОБАМИ MATLAB

*Левицький С.М., ст.викл., Матієнко О. О., студ.
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна
E-mail: leviserg@rambler.ru*

Запропоновано критерій оптимізації системи поперечного регулювання напруги. З використанням об'єктно-орієнтованої бібліотеки нелінійних систем середовища Matlab розроблена комп'ютерна модель системи поперечного регулювання напруги з трансформаторними зв'язками, яка дозволяє знайти параметри системи, що відповідають критерію оптимізації.

Ключові слова: оптимізація, регулювання, трансформатор.

Вступ. На сучасному етапі розвитку електроенергетичних систем, в т. ч. систем регулювання напруги, стає особливо актуальним максимальне зниження витрат на вирішення задач, пов'язаних з управлінням, оптимізацією і плануванням їх режимів. В той же час високий рівень складності розрахункових задач в електропостачанні обумовлює складність відповідних обчислювальних алгоритмів і їх реалізацій на конкретних мовах програмування. Відповідно на розробку і відладку конкретних програмних проектів в цій галузі вимагається достатньо багато часу і засобів [1].

Структура систем регулювання напруги в електроенергетичних системах суттєво нелінійна і викликана, з однієї сторони, дискретністю пристроїв перемикання регулювальних відгалужень, цифровими методами формування сигналів керування, а з іншої, нелінійністю характеристик трансформаторів. Тому проводити параметричну оптимізацію таких систем із застосуванням класичних методів (методу штрафних функцій, градієнтного спуску і ін.) неможливо, а перевага надається дослідженню імітаційних моделей.

Мета роботи. Формулювання критерію оптимізації системи поперечного регулювання напруги, побудова комп'ютерної моделі вказаної системи з блоком оптимізації та визначення коефіцієнту трансформації, який відповідає критерію оптимізації.

Матеріал і результати дослідження. Поперечне регулювання напруги в системах з трансформаторними зв'язками використовується для перерозподілу потоків потужності між паралельно працюючими трансформаторними підстанціями. Мета перерозподілу потоків потужності – зменшення неоднорідності ліній електропередач та втрат потужності на них. Поперечне регулювання напруги викликає в ряді випадків незначну зміну режиму ліній електропередач за напругою. Якість регулювання оцінюється в основному втратами реактивної потужності (різницею між спожитою потужністю та потужністю в лінії електропередач) та відхиленням напруги на споживачах підстанцій за допомогою функціонала [2]:

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{(Q_{\text{наб}}(t) - Q_{\text{зар}}(t) - Q_{\text{сп}})^2 + (k_u \cdot (U_{\text{наб}}(t) - U_{\text{ном}}))^2} dt, \quad (1)$$

де $Q_{\text{наб}}(t)$ – реактивна потужність, яка споживається навантаженням трансформаторної підстанції; $Q_{\text{зар}}(t)$

– зарядна потужність ліній електропередач; $Q_{\text{сп}}$ – реактивна потужність споживачів, що забезпечує утримання напруги на їх вводах в межах норми; $U_{\text{наб}}(t)$ – поточне значення напруги на вводах споживачів; $U_{\text{ном}}$ – номінальне значення напруги на вводах споживачів, k_u – ваговий коефіцієнт впливу поперечного регулювання на відхилення напруг на вводах споживачів.

Чим меншим є значення функціоналу (1), тим вища якість регулювання, але звуження границь функціоналу приведе до погіршення стійкості системи регулювання та виникнення автоколиваний в системі з дискретним регулюючим органом типу пристрою перемикання регулювальних відгалужень трансформатора під навантаженням (РПН).

Закон керування пристроєм РПН трансформатора поперечного регулювання (ТПР):

$$u_x(t) = k_j \left[\sqrt{(Q_{\text{зад}} - Q(t))^2 - k_2 (P(t) - P_{\text{зад}})^2} \right];$$

$$k_j = \begin{cases} \frac{U_{j+1}}{U_{\text{ен}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u_x(t) < u_{\text{нз.х}}, \\ u_x(t-t) < u_{\text{нз.х}}, \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0, \end{cases} \\ \frac{U_j}{U_{\text{ен}}}, \text{ якщо } u_{\text{нз.х}} \leq u(t) \leq u_{\text{вз.х}} \\ \frac{U_{j-1}}{U_{\text{ен}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u_x(t) > u_{\text{вз.х}}, \\ u_x(t-t) > u_{\text{вз.х}}, \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

де $u_x(t)$ – напруга на виході ТПР (поперечна складова напруги на обмотці ВН основного трансформатора); U_j – ЕРС, що індукуються в живильній обмотці ТПР на j -му відгалуженні, k_j – коефіцієнт трансформації на j -му відгалуженні ТПР, $Q_{\text{зад}}$ – задане значення реактивної потужності, що визначає стійкий режим мережі з мінімальними відхиленнями напруги у вузлах електропостачання; k_1 – коефіцієнт, що враховує чутливість пристрою автоматичного керування положенням РПН ТПР; k_2 – коефіцієнт, що визначає вагу активної потужності в формуванні регулюючого впливу за допомогою ТПР; $dQ(t)/dt$ – похідна огинаючої реактивної потужності, яка перетікає через контрольовану

ділянку системи електропостачання; дозволяє, задаючись допустимими з технічної та економічної точки зору відхиленнями функціоналу, сформулювати критерій оптимізації відносно коефіцієнту трансформації ТПП [3]. Критерій оптимізації матиме вигляд:

$$J_1 \rightarrow \min. \quad (3)$$

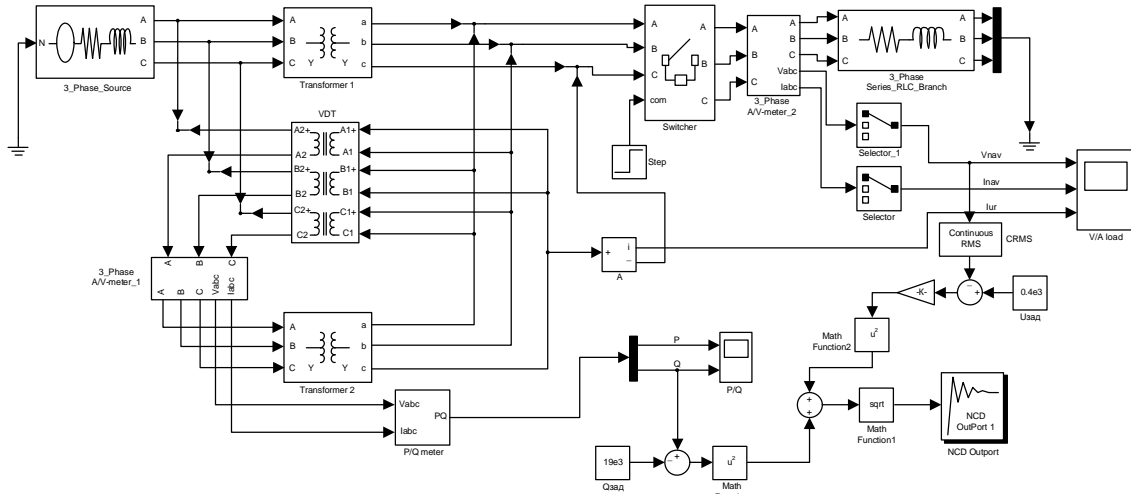


Рисунок 1 – Комп’ютерна модель системи поперечного регулювання напруги

В блоках *Transformer 1* та *Transformer 2* вказуються дані силових трансформаторів (потужність, напругу та частоту первинної і вторинної обмоток, параметри схеми замикання), які працюють паралельно на спільне навантаження, утворюючи замкнену систему електропостачання об’єкту. Блок трансформатора VDT реалізує модель вольтоподаткового трансформатора, який увімкнений за схемою поперечного регулювання. Навантаження системи електропостачання задається ланкою *3_Phase_Series_RLC_Branch* з введенням числових значень активної та індуктивної складових опору навантаження. Для дослідження режимів паралельної роботи трансформаторів в різних режимах роботи (на неробочому ході, навантаження) зручно використати блок *Switcher* з зовнішнім входом керування *com*, який відповідає вимикачу навантаження. Керування станом вимикача навантаження здійснюється від блоку *Step*, яким задається час увімкнення навантаження до трансформаторної підстанції. Вимірювання перетоків активної та реактивної потужностей на вітті *Transformer 2* здійснюється блоком *P/Q meter*, який є одним з інструментів вимірювання, представлених в бібліотеці *Simulink / Sim Power System / Measurement*.

В моделі використовується інструмент оптимізації *NCD outpost (Nonlinear Control Design)*, мета якого – пошук оптимального параметра системи регулювання, який відповідатиме критерію оптимізації [4]. На вході вказаного блоку реалізовано підінтегральну функцію (1), а у вікні властивостей цього блоку (рис. 2) вказується змінна *Tunable variables*, що відповідає шуканому оптимальному параметру системи регулювання. У цьому ж вікні вказуються мінімальне та максимальне значення

Для дослідження системи поперечного регулювання напруги з метою визначення параметрів, які відповідають критерію оптимізації (3), обрано об’єктно орієнтований пакет прикладних програм *Matlab* з його графічним інструментом візуалізації *Simulink*. У вказаному середовищі розроблено комп’ютерну модель, яка представлена на рис. 1.

змінної (*Lower bounds*, *Upper bounds*), за якою проводиться пошук відповідності критерію оптимізації.

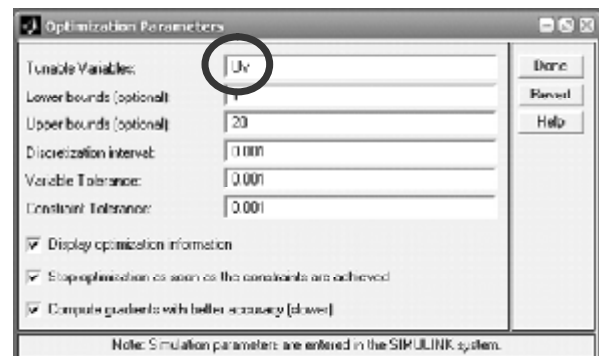


Рисунок 2 – Вікно параметрів блоку *NCD outpost* з вибраним параметром пошуку

В якості такої змінної (*Uv*) вибрано коефіцієнт трансформації ТПП, який безпосередньо впливає на поперечну ЕРС в замкненому контурі системи електропостачання, визначає напрямок та значення перетоку потужності в ній та ступінь завантаження кожної з підстанцій. Тому наступним кроком при проведенні оптимізації є ідентифікація вибраної змінної в розробленій комп’ютерній моделі [5]. У вікні властивостей блоку *VDT* (рис. 3) встановлюємо значення напруги на виході вторинної (послідовної) обмотки, рівної змінній, вказаній в полі блоку оптимізації (*Uv*).

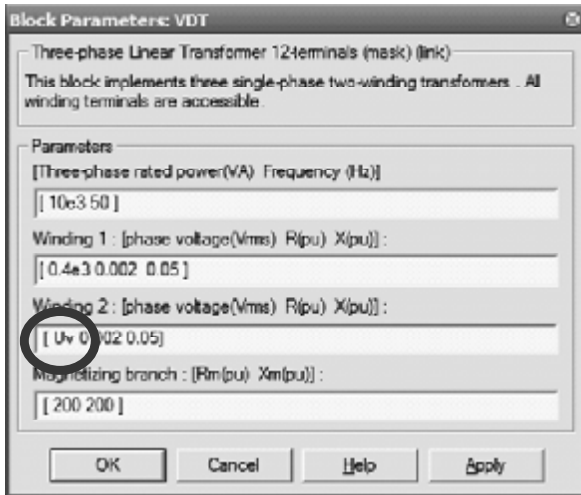


Рисунок 3 – Вікно властивостей блоку *VDT* з параметром пошуку

По суті, ця змінна і є поперечною ЕРС, яка вводиться в контур системи електропостачання, оскільки обмотки трансформатора *VDT* увімкнено по схемі поперечного регулювання. В командному вікні середовища *Matlab* ініціюється змінна U_v , якій присвоюється початкове значення $\gg U_v = 1$.

Після ініціалізації змінної U_v , яка відповідає поперечній ЕРС, у вікні блоку оптимізації *NCD outport* створеної моделі задаються допустимі числові значення критерію оптимізації, в межах яких система вважатиметься налаштованою на оптимум по підінтегральній функції виразу (1). На цьому підготовка до пошуку оптимального значення змінної U_v , яка відповідатиме умовам оптимізації згідно з критерієм (3), закінчена і безпосередньо проводиться обчислення функціоналу (1) для всіх варіантів змінної U_v з вибраним кроком дискретизації (рис. 2). Процес пошуку оптимального параметру 4 відображується графічно шляхом побудови розрахункових даних на площині $Response(Q) = f(t)$ (рис. 4). Першим виводиться графік, що відповідає початковим умовам оптимізації (рис. 4, лінія 1), далі виводиться графік, який частково задовольняє вимоги критерію оптимізації (рис. 4, лінія 2). Якщо в ході обчислень отримано таке значення змінної U_v , що повністю відповідає критерію оптимізації (3), то процес розрахунку автоматично припиняється (рис. 4, лінія 3).

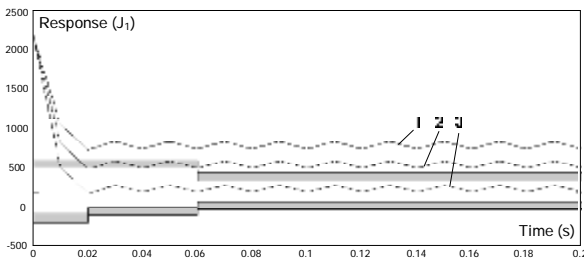


Рисунок 4 – Розв'язання критеріального виразу для варіантів змінної U_v

Знайдене значення змінної U_v (поперечної ЕРС в контурі системи), яке відповідає критерію оптимі-

зації, виводиться в командному вікні середовища *Matlab*:

```
SimPowerSystems processing tp312262 ...
Computing state-space representation of
linear electrical circuit ...
(40 states ; 12 inputs ; 32 outputs ; 6
switches)
Computing steady-state values of
currents and voltages ...
Build the Simulink equivalent circuit
...
(Circuit stored inside
"tp312262/Perturbed/A" block)
Ready.
>> Uv
Uv =
    2.5
```

Для обчисленого значення поперечної ЕРС (напруги на виводах вторинної обмотки трансформатора *VDT*) з допомогою розробленої комп'ютерної моделі можна провести дослідження динамічних характеристик системи поперечного регулювання напруги в режимах неробочого ходу та навантаження. Результати дослідження представлено на рис. 5 (при початковому значенні змінної оптимізації U_v) та рис. 6 (при оптимальному значенні змінної U_v).

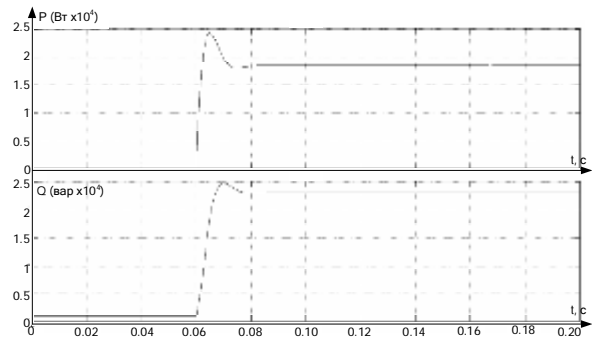


Рисунок 5 – Динамічні характеристики системи поперечного регулювання напруги при початковому значенні змінної оптимізації U_v (вмикання навантаження на 0,06 с)

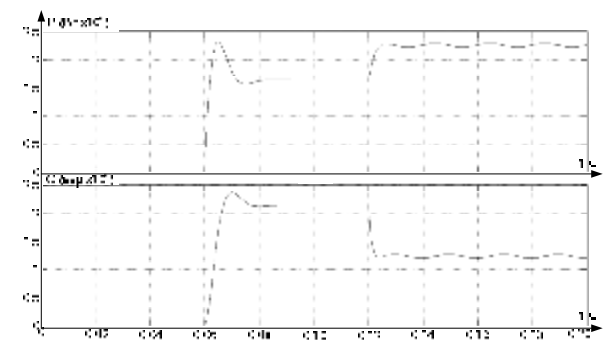


Рисунок 6 – Динамічні характеристики системи поперечного регулювання напруги (вмикання навантаження на 0,06 с, робота зі змінною U_v , що частково задовольняє критерію оптимізації, перехід на оптимальне значення U_v на 0,12 с)

Графіки зміни напруги на вводах споживачів U та струму навантаження I_{nav} , а також струму між трансформаторними підстанціями I_{ur} розраховуються в комп'ютерній моделі та візуалізуються за допомогою блоку *V/A load* та представлені на рис. 7.

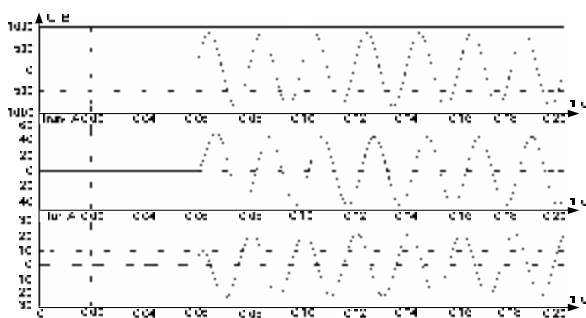


Рисунок 7 – Перехідні процеси в системі електропостачання (при вмиканні навантаження на 0,06 с)

Слід зазначити, що результати визначення оптимального коефіцієнту трансформації відповідають параметрам конкретної системи регулювання, з обумовленими значеннями активних та реактивних опорів трансформаторів, ліній електропередач, навантаження. При інших значеннях навантаження чи параметрах силових трансформаторів вони будуть відрізнятися, але їх легко знайти, використовуючи розроблену модель та описаний метод оптимізації.

Висновки. Запропоновано критерій оптимізації системи поперечного регулювання напруги для оцінки якості її функціонування, що враховує втрати реактивної потужності та відхилення напруги на вводах споживачів.

З допомогою розробленої комп'ютерної моделі проведено розрахунок коефіцієнту трансформації трансформатора поперечного регулювання напруги,

що відповідає запропонованому критерію оптимізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жмак Е. И. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики : Дис. канд. техн. наук : 05.14.02 Новосибирск, 2004. — 120 с. РГБ ОД, 61:05-5/510.
2. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.
3. Грабко В. В. Синтез закона регулювання напруги в електричній мережі в умовах оптимального споживання реактивної потужності / В. В. Грабко, С. М. Левицький, М. П. Свиридов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 2. — С. 34 — 37.
4. Абраменко И. Г. Компьютерные технологии в автоматизированных системах управления электроснабжения / И. Г. Абраменко, А. И. Кузнецов. — Харьков : ХНАГХ, 2008. — 143 с. — ISBN 966-695-079-0.
5. Веремей Е. И. Пособие "Nonlinear Control Design Blockset" [Электронный ресурс] / Е. И. Веремей, С. В. Погожев. — Режим доступа: http://www.tspu.tula.ru/ivt/old_site/lcopy/Matlab_RU/nonlinecondes/book1/pre-face.asp.htm.

Стаття надійшла 26.03.10 р.

Рекомендована до друку к.т.н., доц.
Калиновим А.П.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СРЕДСТВАМИ MATLAB

Левицький С. М., ст. преп., Матиенко О. А., студ.
Винницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна
E-mail: leviserg@rambler.ru

Предложен критерий оптимизации системы поперечного регулирования напряжения. С применением предметно ориентированной библиотеки нелинейных систем среды Matlab разработана компьютерная модель системы поперечного регулирования напряжения с трансформаторными связями, которая позволяет найти параметры системы, удовлетворяющие критерий оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация, регулирование, трансформатор.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE TRANSVERSAL VOLTAGE CONTROL SYSTEMS BY FACILITIES OF MATLAB

Levitskiy S. M., Sen. Lect., Matiyenko O. A., stud.
Vinnytsia national technical university
Khmelnitske shose, 95, 21021, Vinnytsya, Ukraine
E-mail: leviserg@rambler.ru

The criterion of optimization of the transversal voltage control system is offered in work. The computer model of the transversal voltage control system is developed with the use of the subject oriented library of the nonlinear systems of environment of Matlab with transformer connections, which allows to find parameters systems, according to the criterion of optimization.

Key words: optimization, regulation, transformer.