

РОЗРОБКА РЕГУЛЯТОРА СТАТИЧНОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШАХТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

© Гапанович В. Г., Бахор З. М., 2016

Для конкретного об'єкта розроблена структурна схема і виведені рівняння стану регулятора статичного тиристорного регулятора, як підсистеми комплексної системи керування режимом роботи системи електропостачання шахтного навантаження.

Ключові слова: система електропостачання шахтного навантаження, статичний тиристорний компенсатор.

A structure diagram for a particular object has been developed and equations of state has been derived as for subsystem of complex system of operation mode control of electrical power supply system of mining load.

Key words: electrical power supply system of mining load, statical thyristor compensator.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими завданнями

Основними показниками якості електроенергії (ПЯЕ) в шахтних мережах, що істотно впливають на роботу електроприймачів, є відхилення і коливання напруги.

Відхилення напруги на шинах підстанції, що живить шахтне навантаження, за наявності на трансформаторах підстанції пристрою регулювання під навантаженням (РПН), можливо компенсувати зміною коефіцієнта трансформації. Однак в умовах дефіциту реактивної потужності робота РПН не ефективна і для регулювання напруги за допомогою РПН потрібна установка пристроїв компенсації, у якості яких широко використовуються батареї статичних конденсаторів (БСК), чия потужність своєю чергою залежить від режиму роботи РПН. Шахтне навантаження характеризується доволі нерівномірним графіком споживання потужності, а з врахуванням того, що окремі максимуми графіка навантаження збігаються з низькими рівнями напруги в ЕЕС, компенсація відхилень напруги в системі електропостачання (СЕП) шахтного навантаження за допомогою РПН пов'язана з великою кількістю перемикачів анцапф трансформаторів, що знижує надійність електропостачання.

Компенсація коливань напруги на шинах підстанції, що живить шахтне навантаження, можливе через застосування статичних тиристорних компенсаторів (СТК), виконаних на основі наявних на підстанції БСК.

У разі відсутності на трансформаторах підстанції РПН встановлені потужності ємнісної ланки компенсатора (БСК) і його тиристорно-реакторної групи (ТРГ) вибираються за умовами спільної компенсації відхилень і коливань напруги в точці під'єднання СТК [1, 2].

За наявності на підстанції БСК, а на трансформаторах підстанції пристрою РПН, доцільно на базі БСК, за допомогою додаткового встановлення тиристорно-реакторної групи, виконати СТК і об'єднати його і РПН трансформаторів підстанції в комплексну систему керування режимом роботи СЕП шахтного навантаження. При такому об'єднанні пристроїв регулювання у комплексну систему керування досягається зменшення встановленої потужності ТРГ, порівняно з автономною роботою СТК, за рахунок звуження діапазону регулювання (стабілізації) напруги самим СТК. Величина

діапазону регулювання напруги і уставки за часом вибираються, враховуючи припустиму кількість перемикачів РПН за добу, що за досвідом експлуатації не повинне перевищувати 25 разів на добу. У разі виходу напруги на шинах підстанції (точка під'єднання СТК) за межі діапазону регулювання СТК, тиристри ТРГ СТК переходять в один із двох крайніх станів "повністю відкриті" або "повністю закриті" і залежно від цього стану на блок керування РПН трансформаторів підстанції від системи регулювання СТК із витримкою часу подається сигнал на перемикач анцапф трансформатора "на зменшення коефіцієнта трансформації" або "на збільшення коефіцієнта трансформації".

В Україні серійно виготовлюються тиристорні компенсатори реактивної потужності типу ТКРМ, вони призначені для компенсації коливань напруги і її симетрування в системі електропостачання різкозмінного нелінійного несиметричного навантаження. Штатна система регулювання ТКРМ, що побудована за розімкнутим принципом регулювання, забезпечує повну компенсацію реактивної потужності у фазах вузла навантаження, але через відсутність контуру регулювання за напругою не ефективна під час стабілізації напруги в точці під'єднання СТК, тому що не враховує вплив зміни режиму за напругою в електроенергетичній системі (ЕЕС) на напругу шин підстанції. У зв'язку із цим актуальним завданням є розробка структурної схеми і вивід рівнянь стану регулятора СТК як підсистеми комплексної системи керування режимом роботи СЕП шахтного навантаження, що задовольняє вимоги стабілізації напруги.

Актуальність та доцільність роботи

Покращення показників якості електроенергії в шахтних мережах дає змогу підвищити продуктивність і надійність електроприймачів шахтних мереж і є актуальним завданням. Автор не виявив в періодичній літературі досліджень, що пов'язані з розробкою регуляторів СТК, які є підсистемою комплексної системи керування режимом роботи СЕП шахтного навантаження.

Мета і задачі роботи

Метою роботи є покращення показників якості електроенергії в системі електропостачання шахтного навантаження.

Задачею цієї роботи є:

- розробка структурної схеми системи електропостачання шахтного навантаження з СТК;
- виведення рівнянь стану системи електропостачання шахтного навантаження з СТК.

Виклад основного матеріалу

Розробка структурної схеми регулятора проілюстрована на прикладі конкретного об'єкта – районної підстанції 330/220/110 кВ "Нововолинська" Західної енергосистеми, де для стабілізації напруги на шинах 35 кВ, від яких живиться шахтне навантаження, був встановлений СТК на базі наявної на підстанції БСК 35 кВ потужністю 31 МВ·А і ТКРМ-20/6 (20 МВ·А, 6 кВ). Схема під'єднання СТК і розрахункова схема для усталеного режиму наведені на рис. 1.

Об'єктом керування є система електропостачання СЕП (підстанція і енергосистема), параметри режиму $\vec{\Pi}_p$, якої подаються на вхід функційного перетворювача ФП регулятора Р (рис. 2). На другий вхід ФП надходить величина \vec{X}_0 уставки від елемента ЗЕ. Функціональний перетворювач ФП на своєму виході формує напругу регулятора U_p , що керує роботою системи імпульсно-фазового керування (СІФК). СІФК формує кут керування α тиристорів СТК. Струм СТК I_5 залежить від α і відповідно впливає на систему енергопостачання СЕП. В якості вхідних сигналів регулятора прийняті параметри режиму СЕП

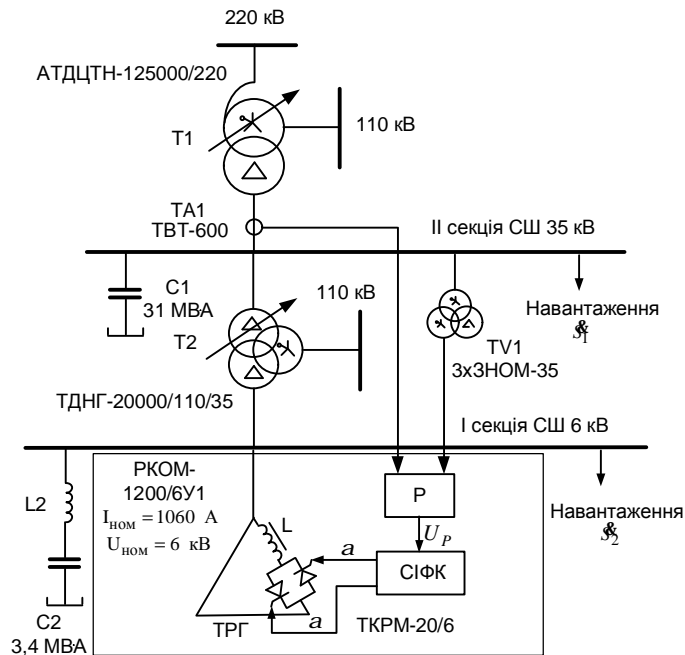
$$\vec{\Pi}_p = (U_1, I_1), \quad (1)$$

де U_1 – напруга II секції шин 35 кВ підстанції; I_1 – струм вводу 35 кВ II секції шин 35 кВ підстанції.

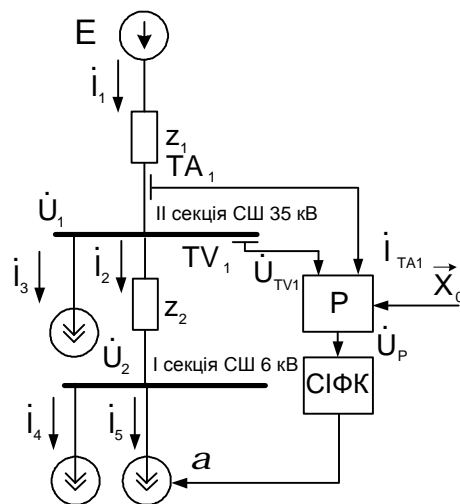
Регулювати пропонується за модулями параметрів $|\underline{U}_{10}|, |\underline{I}_{10}|$, тому елемент ЗЕ регулятора Р має формувати на своєму виході початкові (опорні значення) модулів параметрів

$$\vec{X}_0 = (|\underline{U}_{10}|, |\underline{I}_{10}|, U_{P0}), \quad (2)$$

де $|\underline{U}_{10}|, |\underline{I}_{10}| > 0$ – початкові значення (уставки) по напрузі і струму; $U_{P0} < 0$ – початкове значення (уставка) напруги регулятора, що визначає положення робочої точки (початковий струм реактора за відсутності збурювань по параметрах регулювання).



а)



б)

Рис.1. Спрощена електрична схема підстанції з СТК (а), розрахункова схема для усталеного режиму (б):

E – еквівалентна ЕРС системи; Z_1 – еквівалентний імпеданс системи та автотрансформатора Т1; Z_2 – імпеданс трансформатора Т2; I_3 – джерело струму, що відповідає сумарному навантаженню усіх приєднань II секції СШ 35 кВ за винятком Т1 і Т2; I_4 – джерело струму, що відповідає сумарному навантаженню усіх приєднань I секції СШ 6 кВ за винятком СТК і Т2; \underline{I}_5 (а) – кероване джерело струму, що відповідає навантаженню СТК; α – кут керування тиристорами СТК; $\underline{U}_{TV1}, \underline{I}_{TA1}$ – напруга і струм вторинних обмоток трансформаторів TV і ТА

Для аналізу замкнутої регульованої системи (рис. 2) необхідно сформулювати рівняння струму реактора у функції кута керування тиристорів, системи імпульсно-фазового керування і автоматичного регулятора.

Функціональна залежність першої гармоніки струму реактора СТК визначається як

$$I(a) = I_L f(a) = \frac{U_{ном}}{\omega L_{р ном}} \frac{2(p-a) + \sin 2a}{p}, \quad (3)$$

де $I_L = \frac{U_{ном}}{\omega L_{р ном}} = \frac{6 \cdot 10^3}{314 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3}} = 2548 \text{ А}$ – короткочасний для СТК (до 10 сек) максимальний струм

реактора при $a = \frac{p}{2}$; $U_{ном}$ – номінальна напруга, підведена до фази СТК; $L_{р ном}$ – номінальна індуктивність фази реактора; a – кут керування тиристорів.

У ТКРМ-20/6, використуваного в якості тиристорно-реакторної групи СТК, з метою зменшення масо-габаритних показників реакторів за номінальний струм реактора $I_{L ном} = 1000 \text{ А}$ прийнятий струм при $a = \frac{2}{3}p$ [3].

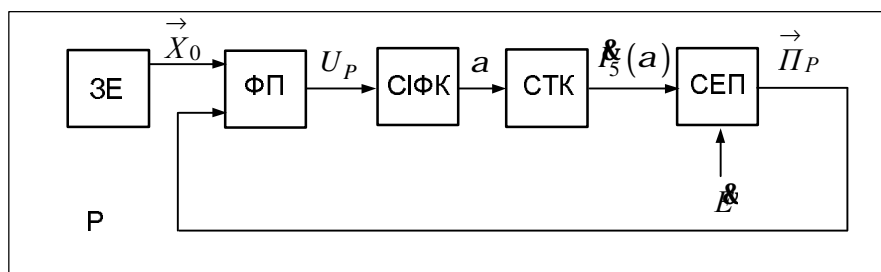


Рис. 2. Структурна схема системи електропостачання з СТК

Фази СТК з'єднані за схемою трикутника, тому лінійний струм дорівнює $I_{5max} = \sqrt{3}I_L$. У діапазоні кутів керування $\frac{2}{3}p \leq a \leq p$ функція $f(a)$ змінює своє значення в межах $0 \leq f(a) \leq \frac{I_{L ном}}{I_L} = 0,392$, що значно більше від зміни напруги, підведеної до фази СТК, тому СТК можна еквівалентувати керованим джерелом струму

$$\mathcal{K}_5 = -jI_{5max} f(a). \quad (4)$$

Для найбільш повного використання можливостей СТК його початковий струм прийнято $I_{50} = 0,5 \cdot 0,392I_{5max}$, що відповідає початковому куту $a_0 = 0,743p$ (рис. 3).

На рис. 4 наведена прохідна характеристика СІФК [3]. Для формування кута керування тиристорів у СІФК використовується генератор пилкоподібної напруги, це забезпечує лінійну залежність кута керування від вхідної напруги регулятора $a = f(U_{вх. СІФК})$. У ТКРМ-20/6 мінімальний кут керування обмежений величиною $\frac{2}{3}p$, що відповідає $U_{вх. СІФК} = U_{р max} = -2,6 \text{ В}$ (рис. 4). Враховуючи це, прохідну характеристику СІФК можна описати рівнянням

$$a = \frac{p}{2} - K_C U_p, \quad (5)$$

де $K_C = 0,064p \left[\frac{1}{\text{В}} \right]$.

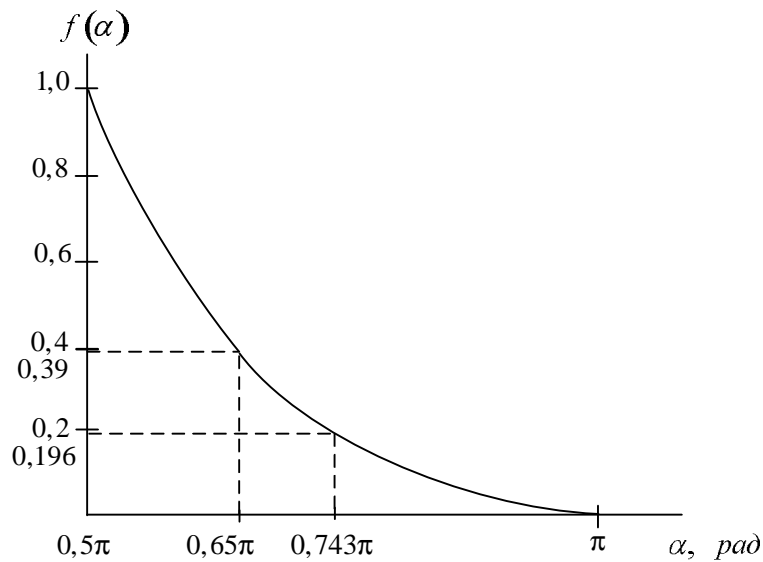


Рис. 3. Графік функції $f(\alpha)$

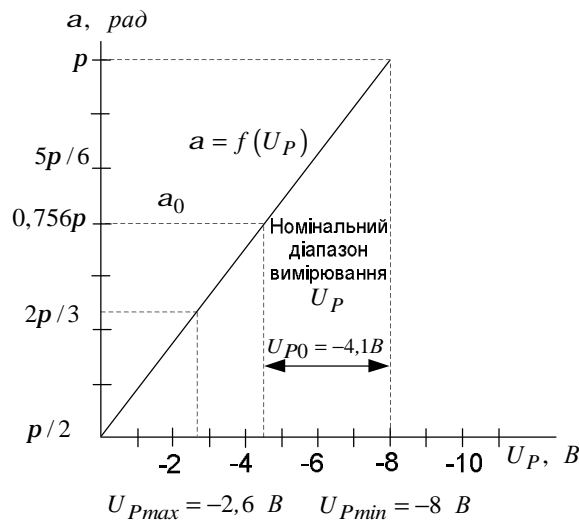


Рис. 4. Прохідна характеристика СІФК СТК

Рівняння прохідної характеристики регулятора (рис. 2), що забезпечує статичне пропорційне регулювання за відхиленням параметрів регулювання $|\underline{U}_1|, |\underline{I}_1|$ від заданих значень уставки $|\underline{U}_{10}|, |\underline{I}_{10}|$ (для інтенсивнішої стабілізації напруги в регулятор вводиться додаткове регулювання за струмом \underline{I}_1), можна записати для приростів параметрів режиму у вигляді

$$\Delta U_p = K_U \Delta U_1 - K_I \Delta I_1, \quad (6)$$

де

$$\Delta U_p = U_p - U_{p0}; \quad (7)$$

$$\Delta U_1 = U_1 - U_{10}; \quad (8)$$

$$\Delta I_1 = I_1 - I_{10}. \quad (9)$$

Початкова (опорна) напруга U_{p0} розраховується за початковим кутом a_0 СТК, який визначається початковим значенням струму $I_{50}(a_0)$, що однозначно задається початковими значеннями

струму I_{10} і напруги U_{10} за заданих початкових значень інших параметрів режиму СЕП і її структури (параметри розрахункової схеми, навантаження, електрорушійні сили (ЕРС) тощо).

Підставивши у (6) співвідношення (7)–(9), одержимо рівняння прохідної характеристики регулятора для абсолютних значень параметрів

$$U_p = U_{p0} + K_U (U_1 - U_{10}) - K_I (I_1 - I_{10}), \quad (10)$$

де $(U_p, U_{p0}) < 0$ за рис. 4; K_U, K_I - коефіцієнти підсилення відхилень відповідно за напругою і струмом.

Рівняння (3)–(6), (10) дають можливість моделювати статичний тиристорний компенсатор у вигляді керованого джерела струму, обладнаного автоматичним регулятором і системою імпульсно-фазового керування.

Для розрахунку ustalених режимів розглянутої системи електропостачання з регульованим СТК (рис. 1) необхідно додатково сформулювати рівняння, що зв'язують діючі значення (модулі) параметрів режиму СЕП – U_1, I_1 з ЕРС системи живлення E , струмом навантаження II секції системи шин 35 кВ \mathcal{X}_3 , струмом навантаження I секції системи шин 6 кВ \mathcal{X}_4 і струмом СТК $\mathcal{X}_5(a)$

$$U_1 = |U_1| = \sqrt{\left(E - \sqrt{3} \left(\operatorname{Im}(\mathcal{X}_3 + \mathcal{X}_4) + \mathcal{X}_5(a)\right) Z_1\right)^2 + \left(\sqrt{3} \operatorname{Re}(\mathcal{X}_3 + \mathcal{X}_4) Z_1\right)^2}; \quad (11)$$

$$I_1 = |I_1| = \sqrt{\left(\operatorname{Re}(\mathcal{X}_3 + \mathcal{X}_4)\right)^2 + \left(\operatorname{Im}(\mathcal{X}_3 + \mathcal{X}_4) + \mathcal{X}_5(a)\right)^2}. \quad (12)$$

У виразах (11), (12) прийнято, що уявна частина $\operatorname{Im} > 0$ при індуктивному струмі і $\operatorname{Im} < 0$ – при ємнісному струмі, струм СТК $\mathcal{X}_5(a)$ має індуктивний характер.

Якщо нехтувати поперечною складовою спадку напруги в імпедансі $Z_1 = jX_1$, тоді остаточно можна записати

$$U_1 = |U_1| \approx E - \sqrt{3} \left(\operatorname{Im}(\mathcal{X}_3 + \mathcal{X}_4) + \mathcal{X}_5(a)\right) X_1, \quad (13)$$

де $Z_1 (X_1)$ – еквівалентний імпеданс (реактанс) системи і автотрансформатора Т1 (рис. 1).

Висновки

Для районної підстанції 330/220/110 кВ "Нововолинська" Західної енергосистеми розроблена структурна схема і виведені рівняння стану регулятора статичного тиристорного регулятора на базі батареї статичних конденсаторів 35 кВ потужністю 31 МВ·А і тиристорного компенсатора реактивної потужності ТКРМ-20/6 (20 МВ·А, 6 кВ) як підсистеми комплексної системи керування режимом роботи системи електропостачання шахтного навантаження, що дає змогу покращити показники якості електроенергії в системі електропостачання шахтного навантаження.

1. Варецький Ю. Е., Гапанович В. Г., Жураховський А. В., Кенс Ю. А. Разработка и исследование регулятора статического тиристорного компенсатора для подстанции общего назначения. / Тезисы научно-технической конференции "Создание и применение тиристорных преобразователей соизмеримой мощности", Харьков, 1990. 2. Гапанович В. Г. Розробка та дослідження регуляторів комплексів систем електропостачання змінного навантаження з СТК: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Маріуполь: 1995, 19 с. 3. Компенсатор реактивной мощности тиристорный ТКРМ / Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИАВК. 435765.001 ТО, 1986.