

УДК 621.314

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ В СИСТЕМАХ З ОБМЕЖЕНИМ СПОЖИВАННЯМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Левицький С.М., асп.

Вінницький національний технічний університет

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

E-mail: leviserg@rambler.ru

В роботі пропонується закон регулювання напруги за допомогою трансформаторів поперечного і продольного регулювання і на його основі синтезований регулятор напруги в системах з обмеженим споживанням реактивної потужності.

Ключевые слова: трансформатор, регулювання, синтез структури.

The law of voltage regulation by means of transformers of cross and longitudinal regulation and synthesized voltage regulator in the systems with the limited consumption of reactive power upon the base of the law are presents in the paper.

Key words: transformer, regulation, synthesis of structure.

Вступ. Якість електроенергії, яка постачається до сучасних підприємств значною мірою залежить від точності підтримання напруги на їх вводах [1]. Стабілізацію напруги у вітчизняних електричних мережах виконують автоматичні системи регулювання, регулюючи вплив яких направлений на перемикання регулювальних відпайок на обмотках високої напруги силових трансформаторів. Для збільшення надійності таких автоматичних систем і подовження терміну експлуатації пристроїв регулювання напруги під навантаженням в автоматичних регуляторах передбачається значна кількість умов та обмежень на дозвіл проведення перемикання. Це в свою чергу приводить до погіршення якості напруги. В [2] запропоновано систему регулювання напруги та доведено ефективність її застосування у вузлі електропостачання. Однак для автоматичного регулятора в такій системі слід синтезувати елементну структуру, що відповідатиме прийнятому закону регулювання напруги.

Матеріал і результати дослідження. В роботі [2] викладена будова системи регулювання напруги в умовах обмеженого споживання реактивної потужності з застосуванням регулятора, що реалізує закон регулювання:

$$u(t) = \sqrt{\left(k_1 \cdot (k_1 \cdot (U(t) - U_{\text{зад}}) - k_2 \cdot (I(t) - I_{\text{min}}))\right)^2 + \left(k_3 \cdot (Q(t) - Q_{\text{зад}})\right)^2},$$

$$k_i; k_j = \begin{cases} k_{i+1}; k_{j+1}, & \text{якщо} \\ \begin{cases} U(t - \tau) > (U_{\text{зад}} + \Delta U), \\ \frac{dU(t)}{dt} > 0, \\ Q(t - \tau) < (Q_{\text{зад}} - \Delta Q), \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0, \end{cases} \end{cases}$$

$$\left. \begin{cases} k_i; k_{j+1}, & \text{якщо} \\ \begin{cases} U(t) = (U_{\text{зад}} \pm \Delta U), \\ Q(t - \tau) < (Q_{\text{зад}} - \Delta Q), \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0, \end{cases} \\ \\ k_{i-1}; k_{j+1}, & \text{якщо} \\ \begin{cases} U(t - \tau) < (U_{\text{зад}} - \Delta U), \\ \frac{dU(t)}{dt} < 0, \\ Q(t - \tau) < (Q_{\text{зад}} - \Delta Q), \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0, \end{cases} \\ \\ k_{i+1}; k_j, & \text{якщо} \\ \begin{cases} U(t - \tau) > (U_{\text{зад}} + \Delta U), \\ \frac{dU(t)}{dt} > 0, \\ Q(t) = Q_{\text{зад}}, \end{cases} \\ \\ k_i; k_j, & \text{якщо} \\ \begin{cases} U(t) = (U_{\text{зад}} \pm \Delta U), \\ Q(t) = Q_{\text{зад}}, \end{cases} \\ \\ k_{i-1}; k_j, & \text{якщо} \\ \begin{cases} U(t - \tau) < (U_{\text{зад}} - \Delta U), \\ \frac{dU(t)}{dt} < 0, \\ Q(t) = Q_{\text{зад}}, \end{cases} \\ \\ k_{i+1}; k_{j-1}, & \text{якщо} \\ \begin{cases} U(t - \tau) > (U_{\text{зад}} + \Delta U), \\ \frac{dU(t)}{dt} > 0, \\ Q(t - \tau) > Q_{\text{зад}}, \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_i; k_{j-1}, \text{ якщо } \left\{ \begin{array}{l} U(t) = (U_{\text{зад}} \pm \Delta U), \\ Q(t-\tau) > Q_{\text{зад}}, \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0, \end{array} \right. \\ \\ k_{i-1}; k_{j-1}, \text{ якщо } \left\{ \begin{array}{l} U(t-\tau) < (U_{\text{зад}} - \Delta U), \\ \frac{dU(t)}{dt} < 0, \\ Q(t-\tau) > Q_{\text{зад}}, \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0, \end{array} \right. \end{array} \right.$$

де $u(t)$ – напруга на шинах підстанції, k_i – коефіцієнт трансформації на i -у відгалуженні обмотки високої напруги (ВН) силового трансформатора з регулюванням під навантаженням (РПН), k_j – коефіцієнт трансформації на j -у відгалуженні трансформатора поперечного регулювання (ТПР), $U_{\text{зад}}$ – задане значення напруги на виводах споживачів, $U(t)$ – дійсне значення напруги на виводах споживачів, k_1 – коефіцієнт, що характеризує чутливість регулятора напруги, k_2 – коефіцієнт, що враховує комплексний опір розподільчої мережі з навантаженням та визначає нахил характеристики зустрічного регулювання напруги, k_3 – комплексний коефіцієнт передачі каналу зв'язку по реактивній потужності через систему керування та ТПР, що враховує опір розподільчої мережі і навантаження та струм мережі. I_{min} – струм навантаження в режимі мінімуму, $I(t)$ – фактичне значення струму навантаження, $Q_{\text{зад}}$ – рівень споживання реактивної енергії з мережі, що відповідає встановленому обмеженню, $Q(t)$ – дійсне значення споживаної реактивної потужності з мережі, τ – час затримки сигналу на перемикання, ΔU – зона нечутливості регулятора по напрузі на споживачах, ΔQ – зона нечутливості регулятора по споживаній реактивній потужності.

На підставі цього закону проведемо синтез цифрової частини структури одного каналу регулятора, який здійснює управління пристроєм РПН ТПР і дозволяє запобігти відхиленням напруги на навантаженні, що викликані підвищенням (або пониженням) споживанням реактивної потужності. В остаточній структурі регулятора цифрова частина другого каналу – прямого регулювання напруги на навантаженні – буде тотожна до синтезованої, оскільки логічні умови для відповідного проведення перемикання пристроєм РПН силового трансформатора є схожими до умов перемикання РПН ТПР.

Враховуючи експлуатаційні характеристики роботи пристроїв РПН, розглянемо реалізацію автоматного графа роботи каналу регулювання рівня споживання реактивної потужності, в якому задіяна зміна коефіцієнту трансформації k_j (1) вольтодобавочного трансформатора ТПР.

Скористаємось математичним апаратом секвенцій [3], який дозволяє створювати компактні представлення та безпосередньо з математичних виразів отримати синтезовану структуру. Позначимо через

y_1 та y_2 вихідні змінні регулятора, які відповідають сигналам на перемикання, що поступають від регулятора на пристрій РПН вольтодобавочного трансформатора. Перший сигнал y_1 повинен мати місце при збільшеному споживанні реактивної потужності і направлений на перемикання пристрою РПН вказаного трансформатора в сторону зменшення коефіцієнту трансформації i , відповідно, збільшення вольтодобавки. Другий сигнал y_2 формується для перемикання пристрою РПН вольтодобавочного трансформатора в зворотному напрямку. Зазначені сигнали y_1 та y_2 повинні бути імпульсними, причому кожному сигналу на перемикання пристрою РПН має відповідати один імпульс на відповідному виході регулятора. Згідно з таким зауваженням в структурі регулятора передбачається наявність генератора тактових імпульсів (ГТІ), що побудований на тригері T_1 . Нехай генератор формує імпульси з тривалістю τ_1 та паузою між ними τ_2 (значення тривалості імпульсів та їх періоду задаватимуться елементами часової затримки в структурі регулятора відповідно τ_1 та τ_2).

Для проведення перемикання з одного положення пристрою РПН в нове (наприклад з k_j в k_{j-1}) необхідний час, який обумовлений інерційністю механічних ланок системи регулювання та послідовністю проведення самого перемикання. За цей час параметри мережі змінюються і для запобігання появи чергової команди на будь-якому виході регулятора під час циклу перемикання слід збільшити тривалість між тактовими імпульсами на величину, що не менша тривалості одного циклу перемикання. Отже, ГТІ повинен працювати в двох різних режимах – режимі очікування (з нормальною паузою між імпульсами τ_2) та режимі перемикання (зі збільшеною тривалістю між тактовими імпульсами – близько $3 \cdot \tau_2$). Тому для задання циклу обробки даних в регуляторі в режимі перемикання необхідно використати тригер T_2 , що формує імпульси з тривалістю τ_1 і проміжком між ними $3 \cdot \tau_2$. По закінченню циклу перемикання регулятор переходить в початковий стан S_0 після надходження від пристрою РПН сигналу про завершення перемикання D (done). Таким чином, якщо регульований параметр знаходиться в зоні нечутливості ($Q(t) \in [Q_{\text{зад}} - \Delta Q; Q_{\text{зад}}]$), то з імпульсом τ_1 регулятор переходить в стан S_1 , а з його закінченням повертається у вихідний стан S_0 .

Входам регулятора згідно з запропонованим законом регулювання (1) відповідають змінні: L (low) – рівень споживання реактивної потужності менше встановленої зони нечутливості, ($Q(t) < Q_{\text{зад}} - \Delta Q$); H (high) – рівень споживання реактивної потужності більше встановленої зони нечутливості, ($Q(t) > Q_{\text{зад}}$);

DN (derivative negative) – похідна регульованого параметру менше 0, ($dQ/dt < 0$); DP (derivative positive) – похідна регульованого параметру більше 0, ($dQ/dt > 0$); DZ (derivative zero) – похідна регульованого параметру рівна 0, ($dQ/dt = 0$);

B (blocking) – сигнал блокування і зупинки регулятора (формується під дією команди на перемикання в відповідному напрямку, коли РПН знахо-

диться в крайньому положенні або в ручному режимі при виникненні аварійної ситуації);

R – сигнал, що відповідає увімкненому стану регулятора і працюючому ГТІ.

Для управління режимом роботи ГТІ (перемикання чи очікування) і встановлення останнього в режим перемикання під дією появи вихідних сигналів y_1 або y_2 введемо тригер T_3 . Для запам'ятовування знаку похідної регульованого параметру при виході його за зону нечутливості на протязі часу затримки сигналу перемикання (що рівний τ_2) введемо відповідно тригери T_4 та T_5 .

З врахуванням наведених тверджень граф функціонування каналу управління ТПР в регуляторі, що реалізує закон (1), матиме вигляд, поданий на рис. 1.

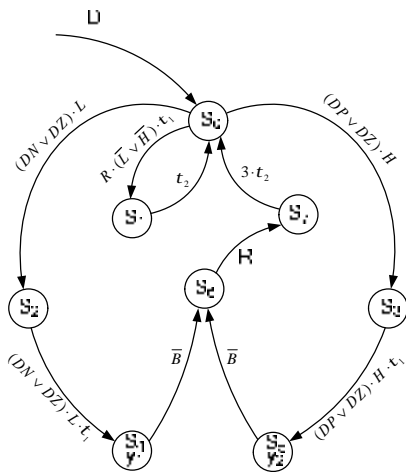


Рисунок 1 – Граф функціонування каналу управління пристроєм РПН трансформатора поперечного регулювання

Граф функціонування системи подамо аналітично, скориставшись секвенціальним записом залежностей станів графа

$$\left\{ \begin{array}{l} D \vdash S_0; \quad (DP \vee DZ) \cdot H \cdot S_0 \vdash S_3; \\ R \cdot (\bar{L} \vee \bar{H}) \cdot \tau_1 \cdot S_0 \vdash S_1; \quad (DP \vee DZ) \cdot H \cdot \tau_1 \cdot S_3 \vdash S_5; \\ \tau_2 \cdot S_1 \vdash S_0; \quad S_4 \cdot \bar{B} \vdash S_6; \quad (2) \\ (DN \vee DZ) \cdot L \cdot S_0 \vdash S_2; \quad S_5 \cdot \bar{B} \vdash S_6; \\ (DN \vee DZ) \cdot L \cdot \tau_1 \cdot S_2 \vdash S_4; \quad S_6 \cdot R \vdash S_7; \\ S_7 \cdot 3 \cdot \tau_2 \vdash S_0 \end{array} \right.$$

з врахуванням, що кожному із станів графу відповідають наступні стани введених тригерів:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 \in \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5; \quad S_4 \in \tilde{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5; \\ S_1 \in T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5; \quad S_5 \in \tilde{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 \bar{T}_5; \\ S_2 \in T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5; \quad S_6 \in \tilde{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5; \\ S_3 \in T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 \bar{T}_5; \quad S_7 \in \bar{T}_1 T_2 T_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5. \end{array} \right. \quad (3)$$

Підставивши вирази (3) в систему (2) проведемо їх мінімізацію згідно [3]. В результаті отримаємо систему секвенцій (4).

На основі мінімізованої системи секвенціальних виразів синтезуємо розгорнуту структурну схему каналу регулятора напруги, що зображена на рис. 2.

На підставі цієї структурної схеми (рис. 3), оста-

точну структуру регулятора напруги в системах з обмеженим споживанням реактивної потужності отримаємо, доповнюючи її каналом управління пристроєм РПН трансформатора, що тотожний синтезованому, та необхідними аналоговими ланцюгами обробки інформації від вимірювальних перетворювачів.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_3 \cdot R \vdash T_1; \\ T_1 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \vdash \bar{T}_1; \quad D \vdash \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5; \\ T_2 \cdot \tau_1 \cdot 3 \cdot \tau_2 \vdash \bar{T}_2; \quad T_3 \cdot R \vdash T_2; \\ (DP \vee DZ) \cdot H \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot H \cdot \bar{B} \vdash T_4 \\ (DN \vee DZ) \cdot L \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot L \cdot \bar{B} \vdash T_5; \quad (4) \\ T_5 \cdot L \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B} \vdash y_1; \\ T_4 \cdot H \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B} \vdash y_2; \\ T_5 \cdot L \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B} \vee \\ (T_4 \cdot H \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B}) \vdash T_3. \end{array} \right.$$

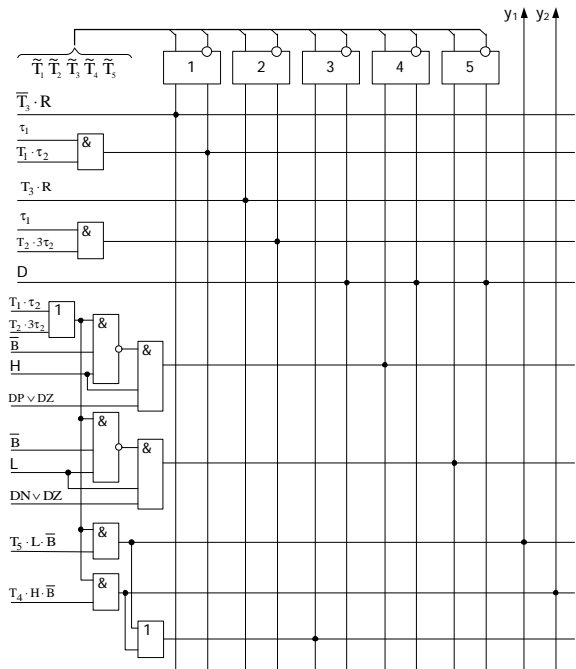


Рисунок 2 – Розгорнута структурна схема каналу управління пристроєм РПН вольтодобавочного трансформатора в регуляторі напруги

З врахуванням існуючої елементної бази схемотехніки [4] схема регулятора напруги, який реалізує закон (1) матиме вигляд, що показаний на рис. 3. На схемі: 1 – вимірювальний трансформатор напруги розподільчої мережі; 2 – вимірювальний перетворювач струму розподільчої мережі; 3, 32 – елементи НІ; 4, 10, 33, 39 – елементи АБО; 5, 9, 13, 24, 25, 26, 34, 38, 42, 52, 54, 55 – елементи І; 6, 27, 35, 56 – блоки пам'яті; 7, 36 – блоки визначення похідної огинаючої вхідного сигналу; 8, 37 – блоки визначення знаку похідної; 11, 21, 40, 50 – перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний; 12, 22, 41, 51 – блоки часової затримки; 14, 23, 43, 53 – підсилювачі ре-

гулятора; 15 – блок множення; 16, 45 – блоки формування і зміни зони нечутливості; 17, 46 – блоки формування і зміни уставки регулятора; 18, 47 – порогові блоки; 19 – фазовий детектор; 20 – блок обчислення синуса; 28 – блок перемикання генератора тактових імпульсів в нормальному режимі; 29 – блок зміни періоду тактових імпульсів генератора;

30 – генератор тактових імпульсів; 31 – елемент контролю електроприводу і схеми регулятора в режимі «Рух відсутній»; 44 – суматор; 48 – вимірвальний перетворювач напруги на навантаженні; 49 – вимірвальний перетворювач струму навантаження; 57 – елемент контролю електроприводу в режимі «Стопоріння»; 58 – блок блокування і сигналізації.

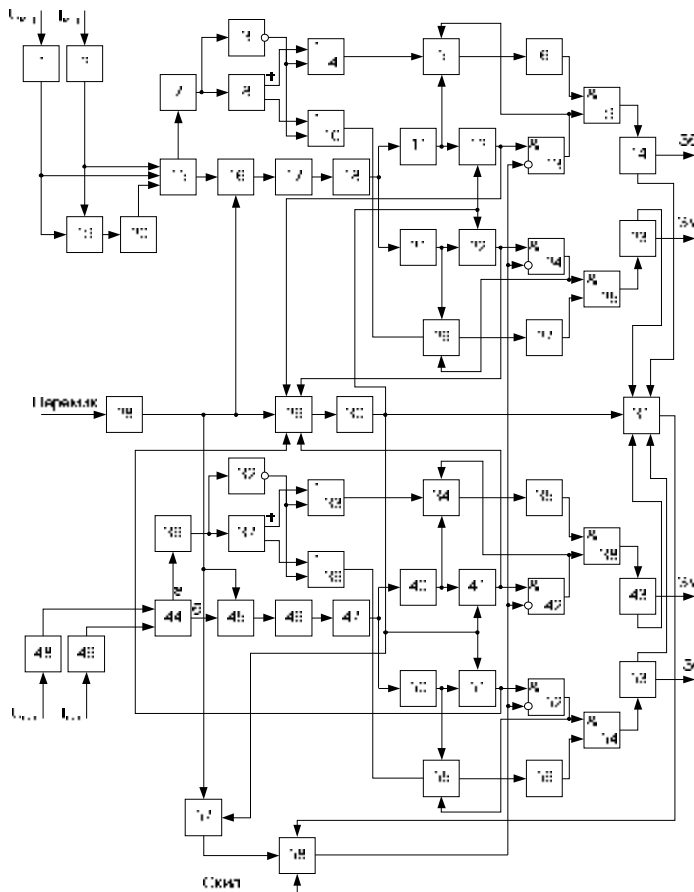


Рисунок 3 – Структурна схема регулятора напруги в системах з обмеженим споживанням реактивної потужності

Сукупність елементів регулятора з 1 по 28 реалізують тракт поперечного регулювання напруги, причому це регулювання здійснюється в функції споживання реактивної потужності з мережі.

Елементи з 32 по 56 формують тракт прямого регулювання напруги, яке здійснюється по відхиленню напруги на споживачах з врахуванням струмової компенсації за допомогою пристрою РПН силового трансформатора. За допомогою елементів 29 та 30 задаються тактові імпульси, що встановлюють режим роботи регулятора, а блоки 28, 31, 57 та 58 діагностують виконання команди регулятора та несправності в ньому.

Висновки. 1. Запропоновано структурно-логічний підхід до технічної реалізації регулятора напруги в системах з обмеженим споживанням реактивної потужності.

2. На основі застосування математичного апарату секвенцій синтезована структура каналу управління пристроєм РПН вольтодобавочного трансформатора в регуляторі напруги в системах з

обмеженим споживанням реактивної енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. В. В. Жуков, Б. К. Максимов. Совершенствование распределительных электросетей 6 – 10 кВ // Новое в российской электроэнергетике. – 2002. – №4.
2. В.В. Грабко, С.М.Левицький, М.П.Свіридов Синтез закону регулювання напруги в електричній мережі в умовах оптимального споживання реактивної потужності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №2. – С. 34-37.
3. Захаров В.Н. Автоматы с распределенной памятью. – М.:Энергия, 1975. – 136 с.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – Т.1. 598 с.

Стаття надійшла 10.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.