

О. Г. Філатов, канд. техн. наук, доц.

МЕТОД ДИСКРЕТНО-ДИНАМІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРАМИ З ПРИСТРОЯМИ РПН

Запропоновано пропорційно-інтегральний закон регулювання напруги з попередньо заданим ступенем стійкості для дискретної в часі системи автоматичного керування силовим трансформатором з пристроєм РПН.

Вступ

Широке використання мікропроцесорної техніки для керування електроустановками, у тому числі для автоматичного керування силовими трансформаторами з пристроями РПН, зумовлює необхідність вдосконалення відомих і розробки нових методів і законів керування. Вони мають бути адекватними можливостям і особливостям цифрових систем і мати відповідні динамічні і статичні характеристики.

Основною функцією систем автоматичного керування силовими трансформаторами з пристроями РПН є функція підтримки напруги в заданих межах, яка реалізується відповідними законами (алгоритмами) керування. Розробка і практична реалізація таких законів для керування силовими трансформаторами висвітлена у багатьох дослідженнях, спрямованих на підвищення якості регулювання напруги і надійності електропостачання [1–5]. При цьому практично відсутні роботи, в яких розглядаються і теоретично доводяться закони, що одночасно забезпечують як заданий ступінь стійкості (збіжності) процесу регулювання напруги, так і протидію неконтрольованим обуренням і мінімізацію помилки регулювання. Синтез таких законів має ґрунтуватися на використанні пропорційно-інтегральних зворотних зв'язків і дискретних в часі моделей, орієнтованих на реалізацію за допомогою цифрової техніки, яка характеризується дискретними в часі вимірюваннями і дискретними в часі керуючими сигналами.

Метою статті є розробка пропорційно-інтегрального закону регулювання напруги, що забезпечує заданий ступінь стійкості замкнутої дискретної в часі системи керування силовим трансформатором з пристроєм РПН.

Матеріали і результат дослідження

В основу розробки закону регулювання покладена методика аналітичного синтезу дискретно-динамічних багатовимірних регуляторів, що описана в роботах [6, 7]. Ця методика дозволяє здійснювати проектування пропорційно-інтегральних регуляторів стану із заданим ступенем стійкості для дискретних в часі динамічних або квазідинамічних систем. При цьому призначення інтегральної складової в регуляторі полягає не лише в протидії випадковим неконтрольованим обуренням і запізнюванням при відробітку керувань, але і у використанні потенційно корисного впливу обурень на процес регулювання.

Структура закону регулювання, що синтезується, в першу чергу визначається моделлю процесу керування. В цій роботі модель процесу керування напругою для дискретної в часі системи керування трансформатором ґрунтується на таких положеннях: а) процес керування напругою вважається одновимірним — напруга регулюється в місці установки одного трансформатора без урахування змін напруги в інших точках електричної мережі; б) вимірювання напруги і видача керуючих сигналів по зміні напруги здійснюються в дискретні моменти часу; в) дискретно-керований процес зміни напруги розглядається як тимчасова послідовність сталих величин на контрольованих відрізках часу; г) модель не оперує статистичними характеристиками і не визначає їх, оскільки для роботи регулятора важлива короткоперіодична інформація, що міститься в поточних вимірюваннях напруги.

Враховуючи викладені вище положення, процес керування напругою в контрольованій точці електричної мережі представляється дискретним в часі квазідинамічним рівнянням вигляду

$$\Delta U(k+1) = \Delta U(k) + \Delta u(k), \quad (1)$$

де $\Delta U(k)$ – відхилення напруги від його номінального (заданого) значення у момент часу t_k ; $\Delta U(k+1)$ – відхилення напруги від його номінального (заданого) значення у момент часу t_{k+1} ; $\Delta u(k)$ – сигнал керування за напругою, що формується системою керування трансформатора у момент часу t_k .

Таким чином, математична модель (1) є часовим переходом вимірюваного відхилення напруги в регульованій точці у момент часу t_k до вимірюваного відхилення напруги в регульованій точці у момент часу t_{k+1} під впливом відомого керувального сигналу $\Delta u(k)$. Проте, слід зазначити, що в реальних умовах експлуатації виміряне відхилення напруги містить і випадкову складову, зумовлену дією випадкових неконтрольованих збурень в електричній мережі, і запізнення у створенні сигналів керування. Вважається, що величини $\Delta U(k)$, $\Delta u(k)$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ є кусково-постійними функціями часу на інтервалах $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ та визначаються в дискретні моменти часу t_k , $k = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Формування сигналу керування за напругою $\Delta u(k)$, тобто закон керування, розглядати-мо у вигляді пропорційно-інтегрального (ПІ) зворотного зв'язку (ЗЗ) вигляду

$$\Delta u(k) = C_1 \cdot \Delta U(k) + C_2 \cdot S(k), \quad (2)$$

де C_1 – коефіцієнт підсилення пропорційної складової ЗЗ; C_2 – коефіцієнт підсилення інтегральної складової ЗЗ; $S(k)$ – змінна, що характеризує інтегральну зміну величини відхилення напруги $\Delta U(k)$ за деякий період часу. Зазначимо, що перерахунок сигналу керування $\Delta u(k)$ в коефіцієнт трансформації може робитися за формулами, наведеними в роботах [1, 2].

Завдання синтезу закону керування (2) полягає в розробці процедур обчислення таких коефіцієнтів підсилення C_1 і C_2 , які забезпечать заздалегідь заданий ступінь стійкості (збіжності для квазідинамічної системи) процесу керування (1).

Як відомо, інтегральна складова, яка вводиться для протидії випадковим відхиленням і зменшення сталої помилки системи, знижує ступінь стійкості замкнутої системи керування. Далі розглядається така процедура, яка дозволяє забезпечити заздалегідь заданий ступінь збіжності процесу керування напругою (1) за наявності інтегральної складової шляхом включення в контур керування не лише відхилення напруги, але і його середнього значення на деякому періоді керування.

Як змінну $S(k)$, що характеризує інтегральну зміну величини відхилення напруги $\Delta U(k)$, розглядатимемо середнє значення відхилення напруги:

$$S(k) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \Delta U(j), \quad (3)$$

де m – кількість часових інтервалів (кроків) керування $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ з початку заданого періоду керування ΔT_k на теперішній момент часу t_k ($T_k > t_k$).

Рівняння (3) запишемо у вигляді рекурентного рівняння, прийнявши, що регулятор на $(k+1)$ -му кроці прагнутиме забезпечити рівне нулю відхилення напруги, тобто:

$$S(k+1) = \frac{1}{k+1} \Delta U(k) + \frac{k-1}{k+1} S(k-1). \quad (4)$$

Об'єднавши рівняння (1), (2) і (4), отримаємо матричне рівняння:

$$\begin{bmatrix} \Delta U(k+1) \\ S(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{k+1} & \frac{k-1}{k+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U(k) \\ S(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta u(k), \quad (5)$$

яке характеризує керований процес зміни напруги та його середнього значення.

Керувальний сигнал $\Delta u(k)$ відповідно до рівняння (2), враховуючи рівняння (5), запишемо в такому вигляді:

$$\Delta u(k) = [C_1 \quad C_2] \cdot \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ S(k-1) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Підставивши рівняння (6) в рівняння (5), отримаємо рівняння замкнутої системи:

$$\begin{bmatrix} \Delta U(k+1) \\ S(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+C_1 & C_2 \\ \frac{1}{k+1} & \frac{k-1}{k+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U(k) \\ S(k-1) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Характеристичний поліном системи (7) має такий вигляд:

$$\lambda^2 - \left(C_1 + \frac{2k}{k+1} \right) \cdot \lambda + \frac{(k-1) + C_1 \cdot (k-1) - C_2}{k+1} = 0. \quad (8)$$

Прирівнявши коефіцієнти полінома (8) коефіцієнтам характеристичного полінома другого порядку із задалегідь заданими значеннями коренів (зв'язок між коренями полінома і його коефіцієнтами визначається відомими формулами Вієта), отримуємо

$$C_1 = \lambda_1^{\text{зад}} + \lambda_2^{\text{зад}} - \frac{2k}{k+1}; \quad (9)$$

$$C_2 = (k-1) \left(1 + \lambda_1^{\text{зад}} + \lambda_2^{\text{зад}} - \frac{2k}{k+1} \right) - \lambda_1^{\text{зад}} \lambda_2^{\text{зад}} (k+1), \quad (10)$$

де $\lambda_1^{\text{зад}}, \lambda_2^{\text{зад}}$ — задані значення коренів характеристичного полінома другого порядку.

Таким чином, рівняння (9) і (10) визначають процедуру обчислення коефіцієнтів посилення пропорційної і інтегральної ЗЗ для системи керування трансформатором. Очевидно, що обчислені таким чином коефіцієнти дозволяють забезпечити замкнутій системі (7) бажані наперед задані власні числа в просторі відхилення напруги і його середнього значення.

Максимальну ступінь збіжності дискретного в часі процесу керування можна отримати, розмістивши задані корені характеристичного рівняння на початку координат комплексної площини. В цьому випадку з (9) і (10) визначаються оптимальні значення коефіцієнтів посилення ЗЗ, тобто

$$C_1^{\text{опт}} = -\frac{2k}{k+1}; \quad (11)$$

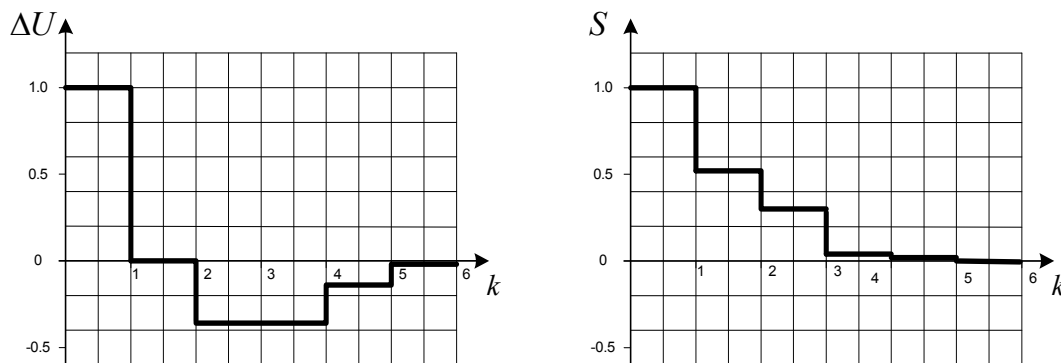
$$C_2^{\text{опт}} = -\frac{(k-1)^2}{k+1}. \quad (12)$$

Як впливає з (9)–(12), коефіцієнти підсилення в пропорційно-інтегральному законі регулювання (6) є змінними в часі величинами, які змінюються залежно від кроку керування k . Таким чином, розроблений закон керування (6) має не лише оптимальні властивості при коефіцієнтах ЗЗ, що обчислюються за (11) і (12), але також і адаптивні властивості із самонастроюванням коефіцієнтів ЗЗ. Зазначимо, що в реальних умовах використання цього закону параметр кроку k необхідно встановлювати рівним нулю на початку кожного задалегідь заданого періоду керування $\Delta T(k)$, а також у разі досягнення заданої точності регулювання.

Перехідна функція замкнутої системи (7) з оптимальним налаштуванням коефіцієнтів підсилення ЗЗ, що зроблено за (11) і (12) для змінних U та S , показана на рисунку.

Аналіз перехідної функції (рис.) показує, що при ступінчастому відхиленні напруги та при незаданому (тобто нульовому) діапазоні нечутливості регулятора помилка регулювання напруги і середнє значення відхилення напруги стають рівними менше 3 % на п'ятому кроці регулювання. Перехідна функція для середнього відхилення напруги (S) має експоненціальний характер. При цьому, кількість спрацьовувань регулятора (ΔU) має мінімально можливе значення і мінімальне перерегулювання для заданого ступеня збіжності. Очевидно, що зада-

ючи ненульову зону нечутливості, кількість спрацьовувань регулятора зменшуватиметься. Це важливо для реальних умов експлуатації, коли прагнуть зменшити кількість спрацьовувань перемикальних пристроїв силових трансформаторів.



Перехідна функція замкнутої системи (7) з оптимальним налаштуванням коефіцієнтів підсилення ЗЗ

Висновки

Регулювання напруги за пропорційно-інтегральним законом забезпечує заданий ступінь стійкості замкнутої дискретної в часі системи керування силовим трансформатором з пристроєм РПН.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техніка, 1985. — 104 с.
2. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : моног. / В. В. Грабко. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 109 с.
3. Грабко В. В. Про один метод синтезу регулятора напруги для силових трансформаторів з пристроями РПН / В. В. Грабко, І. Ю. Львов // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия : Электротехника и энергетика. — Донецк : ДонГТУ, 1999. — Вып.4. — С. 258—262.
4. Мокин Б. И. До питання підвищення ефективності регулювання напруги в електричних мережах / Б. И. Мокин, В. В. Грабко, І. Ю. Львов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1999. — № 3. — С. 32—35.
5. Пат. 35207А Україна. МКИ Н02 Р13/06. Регулятор напруги для силових трансформаторів / Б.И. Мокин, В.В. Грабко, І. Ю. Львов // Вінницький державний технічний університет. — № 99094925; заявл. 03.09.99; опубл. 15.03.01, Бюл. № 2.
6. Филатов А. Г. Стабилизация электрических нагрузок в электроэнергетических системах / А. Г. Филатов // Технічна електродинаміка. Темат. вип. Проблеми сучасної електротехніки. — 2006. — Ч. 5. — С. 3—8.
7. Филатов А. Г. Синтез регулятора состояния для дискретной во времени системы модального управления / А. Г. Филатов // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 2. — С. 80—93.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 14.10.11
Рекомендована до друку 28.02.12

Філатов Олександр Григорович — доцент кафедри електричних станцій.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ