ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ НЕСИМЕТРІЇ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ

Маков Д.К., доц.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедри теоретичної електротехніки
Антонюк О.І., ст. викл.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедри електронно-обчислювальної апаратури
Чупак В.В., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедри технології машинобудування

Вступ. Одним із показників якості електроенергії (ПЯЕ) є коефіцієнт несиметрії (КН), який характеризується напругою зворотної послідовності (НЗП) основної частоти. Для аналогового виділення НЗП використовуються фільтри симетричних складових (ФСС), котрі широко описані в літературі [1].

При вимірюванні КН основна проблема полягає у тому, що необхідно виділити мале інформативне значення НЗП (до 4В) на фоні великої (біля 220В) напруги прямої послідовності (НПП) при відхиленні частоти напруги електричної мережі, що досліджується, від розрахованого для ФСС значення.

Якщо ФСС виготовлений з елементами, параметри яких не відповідають розрахунковим значенням (з розкидом), то при подачі на його входи НПП, на виходах вона буде сприйматись, як трифазна напруга, яка включає в собі НЗП. Ця уявна несиметрія може спотворювати результати вимірів КН.

Мета роботи. Проведення аналізу рівнянь перетворення напруги трифазними ФСС для розробки вимірювального перетворювача КН та рекомендацій по корекції домінуючих похибок ФСС при вимірюванні КН. Основна увага приділяється корекції похибок, зумовлених неідентичністю параметрів елементів ФСС розрахунковим значенням.

Результати досліджень. Пристрій складається з фільтрів симетричних складових, ввімкнених каскадно і розділених узгоджуючими каскадами. ФСС містять в своїх ланках резистори та конденсатори, параметри *R, C* яких можуть відхилятися від своїх розрахункових значень. Розкид параметрів призводить до неідентичності коефіцієнта передачі ФСС розрахунковим значенням для лінійних наруг $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$.

В [2] отримано рекурентний вираз для лінійних трифазних напруг $\dot{U}_{aibi}, \dot{U}_{bici}, \dot{U}_{ciai}$ на виходах каскадно увімкненого *i* –го ФСС.

$$\left(\dot{U}_{aibi} \quad \dot{U}_{bici} \quad \dot{U}_{ciai}\right)^T = \dot{U}_{1(1)(i)}\left(a_+\right) + \dot{U}_{2(1)(i)}\left(a_-\right), \tag{1}$$

де: $(\ )^T$ – символ оператора транспонованої матриці,

$\left(\dot{U}_{aibi} \quad \dot{U}_{bici} \quad \dot{U}_{ciai}\right)^T$ – матриця трифазних лінійних напруг на виходах *i* –го ФСС,

$a = \exp(j\,2\pi/3)$; $\dot{U}_{1(1)}\left(a_+\right) = \dot{U}_{1(1)}\begin{pmatrix}1\\ a^2\\ a\end{pmatrix} = \dot{U}_{1(1)}\left(1 \quad a^2 \quad a\right)^T$ – НПП основної частоти;

$\dot{U}_{2(1)}\left(a_{-}\right)=\dot{U}_{2(1)}\left(1 \quad a \quad a^2\right)^T$ – НЗП основної частоти;

$\dot{U}_{1(1)(i)}\left(a_{+}\right)=\dot{\alpha}_i\dot{U}_{1(1)(i-1)}\left(a_{+}\right)+\dot{\gamma}'_i\dot{U}_{2(1)(i-1)}\left(a_{+}\right)$ – НПП на виходах *i*-го ФСС;

$\dot{U}_{2(1)(i)}\left(a_{-}\right)=\dot{\beta}_i\dot{U}_{2(1)(i-1)}\left(a_{-}\right)+\dot{\gamma}_i\dot{U}_{1(1)(i-1)}\left(a_{-}\right)$ – НЗП на виходах *i*-го ФСС.

$\dot{\alpha}_i=\left(\dot{U}_{aibi+}+a\dot{U}_{bici+}+a^2\dot{U}_{ciai+}\right)/3\dot{U}_{1(1)(i-1)}$ – коефіцієнт передачі *i*-го ФСС для НПП; $\dot{\beta}_i=\left(\dot{U}_{aibi-}+a^2\dot{U}_{bici-}+a\dot{U}_{ciai-}\right)/3\dot{U}_{2(1)(i-1)}$ – те саме для НЗП;

$\dot{\gamma}_i=\left(\dot{U}_{aibi+}+a^2\dot{U}_{bici+}+a\dot{U}_{ciai+}\right)/3\dot{U}_{1(1)(i-1)}$ – коефіцієнт передачі НПП, зумовлений несиметрією ФСС внаслідок розкиду параметрів його елементів, $\dot{\gamma}'_i=\left(\dot{U}_{aibi-}+a\dot{U}_{bici-}+a^2\dot{U}_{ciai-}\right)/3\dot{U}_{2(1)(i-1)}$ – те саме для НЗП.

Запропонований алгоритм.

При реалізації цього алгоритму для зменшення НПП використовується двокаскадний ФСС. Вхідна трифазна напруга через комутатор К1 подається на вхідні блоки a_b,b_b,c_b, входи ФСС1 і вихідна напруга знімається з виходів ФСС2. Входи ФСС1 і виходи ФСС2 одночасно перемикаються «по колу» комутаторами К1 і К2. Напруга з виходів другого ФСС через комутатор К2, віднімальну схему та фільтр низьких частот подається на фазочутливий вольтметр.

1 крок. Фазна наруга А, В, С підключається через комутатор К1 відповідно, до вхідних блоків a_b,b_b,c_b. Далі через вхідні блоки – до входів А1,В1,С1 першого ФСС1. Вихідна напруга з виходів а2,в2,с2 ФСС2 через комутатор К2 підключається до віднімальної схеми та фільтр низьких частот.

Використовуючи вираз (1), напругу на виходах комутатора К2 при виділенні НЗП можна записати наступним чином $(\alpha_1\approx\alpha_2\approx\gamma_1\approx\gamma'_1\approx\gamma_2\approx\gamma'_2\to 0;\beta_1\approx\beta_2\approx 1)$:

$$\left(\dot{U}_{a2b2}\dot{U}_{b2c2}\dot{U}_{c2a2}\right)^T=$$

$$=\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2\dot{U}_{1(1)}\left(a_{+}\right)+\dot{\beta}_2\dot{\beta}_1\dot{U}_{2(1)}\left(a_{-}\right)+\left[\dot{k}_1\dot{U}_{1(1)}\left(a_{+}\right)+\dot{k}_2\dot{U}_{2(1)}\left(a_{-}\right)\right], \qquad (2)$$

де $\dot{k}_1,\dot{k}_2$ – коефіцієнти передач напруг, відповідно, прямої та зворотної послідовності, які викликані розкидом параметрів вхідних блоків, елементів ФСС1 і ФСС2, $\dot{k}_1\dot{U}_{1(1)}\left(a_{+}\right)+\dot{k}_2\dot{U}_{2(1)}\left(a_{-}\right)$ – сумарна векторна похибка, зумовлена цим розкидом.

Перший доданок в (2) вказує, у скільки раз (в $1/(\alpha_1\alpha_2)$ раз) ослаблюється НПП. Якщо отримане ослаблення – недостатнє, можна додати третій ФСС і т.д.

Лише другий доданок у (2) пропорційний НЗП. Складові у квадратних дужках становлять векторну похибку від неідентичності параметрів вхідних

блоків і параметрів елементів ФСС. Найбільший вплив при однакових ФСС вносить доданок $\dot{\beta}_2\dot{\gamma}_1\dot{U}_{1(1)}(a_-)$ у квадратних дужках, який за модулем може бути співрозмірним або навіть більшим за другий доданок $\dot{\beta}_2\dot{\beta}_1\dot{U}_{2(1)}(a_-)$ у (2).

2 крок. За допомогою комутаторів К1 і К2 виконується перемикання вхідних затискачів першого ФСС1 і вихідних затискачів другого ФСС2 «по колу».

Напруга фаз А, В, С підключается, відповідно, до входів В1, С1, А1 першого ФСС. Напругу $(\dot{U}'_{a2b2}\quad \dot{U}'_{b2c2}\quad \dot{U}'_{c2a2})^T$ на виходах комутатора К2 можна представити у наступному вигляді:

$$(\dot{U}'_{a2b2}\quad \dot{U}'_{b2c2}\quad \dot{U}'_{c2a2})^T = \dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2\dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{\beta}_2\dot{\beta}_1\dot{U}_{2(1)}(a_-) + a\left[\dot{k}_1\dot{U}_{1(1)погр}(a_+) + \dot{k}_2\dot{U}_{2(1)погр}(a_-)\right] \qquad (3)$$

З (2) та (3) видно, що вектори двох останніх доданків (2) повернулися на $120°$.

3 крок. Знову за допомогою комутаторів К1 і К2 виконується перемикання вхідних затискачів першого ФСС1 і вихідних затискачів другого ФСС2 «по колу».

Напруга фаз А, В, С підключається, відповідно, до входів С1, А1, В1 першого ФСС. Напругу $(\dot{U}''_{a2b2}\quad \dot{U}''_{b2c2}\quad \dot{U}''_{c2a2})^T$ на виходах комутатора К2 можна представити у наступному вигляді:

$$(\dot{U}''_{a2b2}\quad \dot{U}''_{b2c2}\quad \dot{U}''_{c2a2})^T = \dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2\dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{\beta}_2\dot{\beta}_1\dot{U}_{2(1)}(a_-) + a^2\left[\dot{k}_1\dot{U}_{1(1)погр}(a_+) + \dot{k}_2\dot{U}_{2(1)погр}(a_-)\right].$$

4 крок. Відбувається підсумування результатів вимірів перших трьох тактів.

$$\begin{aligned}(\dot{U}_{a2b2}\dot{U}_{b2c2}\dot{U}_{c2a2})^T_{4рез} &= (\dot{U}_{a2b2}\dot{U}_{b2c2}\dot{U}_{c2a2})^T + (\dot{U}'_{a2b2}\dot{U}'_{b2c2}\dot{U}'_{c2a2})^T + \\ &+ (\dot{U}''_{a2b2}\quad \dot{U}''_{b2c2}\quad \dot{U}''_{c2a2})^T = 3\left[\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2\dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{\beta}_2\dot{\beta}_1\dot{U}_{2(1)}(a_-)\right]\end{aligned} \qquad (4)$$

Тобто (4) представляє собою потроєне значення НЗП.

Результат вимірів НЗП (4) не залежить від похибки, зумовленої неідентичністю (розкидом) параметрів елементів ФСС.

Висновок. Проведений авторами аналіз рівнянь перетворення ФСС та запропонований алгоритм показують доцільність корекції похибки, зумовленої неідентичністю (розкидом) параметрів елементів ФСС, для підвищення точності виміру КН.

Перелік посилань

1. *Фабрикант В.Л.* Фильтры симметричных составляющих. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962, 424 с.

2. *Щерба А.А., Маков Д.К., Захарченко С.Н., Супруновская Н.И.* Анализ уравнений преобразования трехфазных напряжений при каскадном соединении фильтров симметричных составляющих / Праці Інституту електродинаміки НАН України, №3(12), Київ, 2005. – С. 8-15.