

## Вимірювання струмів в трифазних вимірювальних комплексах потужності та електроенергії

Досліджено особливості роботи груп трансформаторів струму і похибки вимірювання ними фазних струмів високовольтних електромереж в схемах, поширених у вимірювальних комплексах потужності та електроенергії. Запропоновано універсальну модель похибки вимірювання трифазного струму, що враховує внутрішню конфігурацію схеми вимірювань.

Исследованы особенности работы групп трансформаторов тока и погрешности измерения ими фазных токов высоковольтных электросетей в схемах, распространенных в измерительных комплексах мощности и электроэнергии. Предложена универсальная модель погрешности измерения трехфазного тока, которая учитывает внутреннюю конфигурацию схемы измерений.

В трифазних вимірювальних комплексах потужності та енергії (ТВК) інформація про струм отримується за допомогою груп з двох або трьох фазних трансформаторів струму (ТС) для вимірювань. Відомі дві основні вимоги до побудови вторинних кіл ТС, що використовуються як індивідуально, так і в складі ТВК. Вони наступні: вторинне навантаження ТС має бути незначним, оскільки розмикання вторинного кола загрожує високими перенапругами; один з затискачів вторинної обмотки повинен заземлятися, щоб захистити вторинні пристрої від можливих значних перенапруг. За умови дотримання зазначених вимог, виходячи з потреби практики вимірювань, можуть створюватися вимірювальні схеми з різною кількістю задіяних в них ТС і різним з'єднанням їх між собою і вторинним навантаженням. Наприклад, схема з двома ТС з послідовно або паралельно з'єднаними вторинними обмотками, що живлять спільне навантаження; схема з трьома ТС, кожен з власним вимірювальним навантаженням і спільним для усіх ТС навантаженням в загальній гілці вторинного кола.

В ТВК потужності та енергії поширені три типи вимірювальних схем струму (рис. 1): група з трьох ТС, з'єднаних в зірку, до яких підключені з'єднані в зірку струмові ланцюги трьох вимірювальних елементів лічильника (а); група з двох ТС, з'єднаних в неповну зірку, до яких підключені струмові ланцюги трьохелементного лічильника, з'єднані в зірку (б); група з двох ТС, з'єднаних в неповну зірку, до яких підключені струмові ланцюги двохелементного лічильника (в). Остання схема відповідає і випадку підключення двохелементного лічильника до групи з трьох ТС, тобто і за присутності ТС в фазі В, оскільки останній в цьому разі не задіяний в ТВК.

Режими навантаження і роботи кожного ТС в трифазній схемі в загальному випадку залежать від величини та характеру як власного струмового і

вторинного навантаження, так і навантажень інших ТС даної схеми, отже і похибки вимірювання трифазних струмів, що залежать від зазначених факторів, за таких умов є відмінними від похибок окремих фазних ТС схеми вимірювань [1, 3]. Дослідимо зазначені особливості вимірювання трифазних струмів в ТВК.

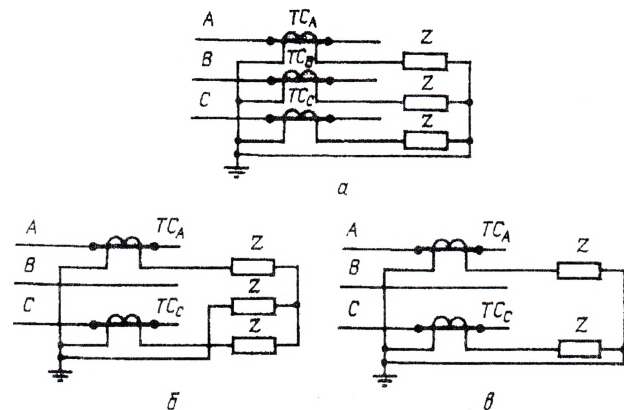


Рис. 1

В симетричному режимі роботи електромережі, а також несиметричному її режимі за умови незначного опору нульового проводу схем вимірювань рис. 1, а та рис. 1, в, режим роботи ТС в цих групах не відрізняється від режиму роботи окремого ТС. Однак інша картина спостерігається в схемі рис. 1, б. Розглянемо режими роботи ТС в цій схемі. Виходячи з того, що в окремому ТВК зазвичай використовують ТС з однаковими номінальними коефіцієнтами трансформації і лічильники з ідентичними характеристиками вимірювальних елементів, нехтуючи гілкою намагнічування ТС, отримаємо наступну схему заміщення (рис. 2), де  $Z_{2ТСА}$ ,  $Z_{2ТСГ}$  — опори вторинних обмоток ТС фаз А і С,  $Z = z e^{j\varphi}$  — вхідний опір струмового кола вимірювального еле-

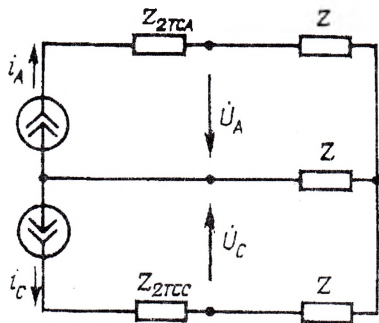


Рис. 2

мента лічильника.

В симетричному режимі роботи трифазного приєднання з однаковими за модулем струмами в фазах А і С і кутом між ними, рівним  $120^\circ$ , вторинне навантаження  $TC_A$  і  $TC_C$  складає

$$Z_{2A} = \dot{U}_A / \dot{I}_A = \sqrt{3}ze^{j(\varphi+30^\circ)},$$

$$Z_{2C} = \dot{U}_C / \dot{I}_C = \sqrt{3}ze^{j(\varphi-30^\circ)}.$$

Отже, робота ТС в складі такої схеми супроводжується, навіть за симетричного режиму роботи електромережі, зростанням в  $\sqrt{3}$  модуля вторинного навантаження кожного з двох ТС, що входять до складу ТВК, і зміною його кута, порівняно з навантаженням окремо взятого ТС. До того ж цей кут в кожному з ТС характеризується різними знаками. Несиметричний режим роботи призводить до ще більшої відмінності навантажень ТС групи. Наприклад, в неповнофазному режимі, при відсутності струму в одній з фаз, на яких встановлено ТС, навантаження ТС другої фази дорівнює  $2Z$ .

Таким чином, при розв'язанні задач диспетчерського управління та обліку електроенергії, для яких вимірювальна інформація про струм є найвагомішою, групи або схеми з'єднань ТС необхідно розглядати як єдине ціле. Такий підхід значно ускладнює оцінювання похибок ТВК потужності та електроенергії, однак забезпечує його більшу точність, а, відповідно, вищу якість розв'язання задач управління електромережами.

В самому загальному випадку багатоопераційна процедура вимірювання струму в ТВК може бути представлена у вигляді схеми, поданої на рис. 3, де  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$ , — фазні струми контролюва-

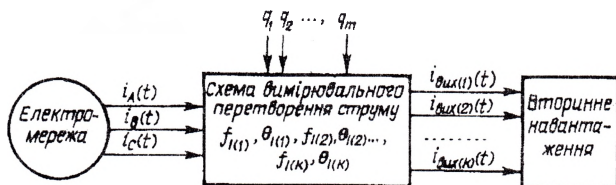


Рис. 3

ної електромережі;  $f_{1(1)}, Q_{1(1)}, f_{1(2)}, Q_{1(2)}, \dots, f_{1(k)}, Q_{1(k)}$  — метрологічні характеристики схеми вимірювання струму;  $q_1, q_2, \dots, q_m$  — зовнішні фактори, що впливають на точність вимірюваного струму;  $i_{\text{вх}(1)}(t), i_{\text{вх}(2)}(t), \dots, i_{\text{вх}(k)}(t)$  — вихідні струми вимірювальної схеми. Кількість вихідних струмів  $k$  визначається кількістю вимірювальних елементів, що складають вторинне навантаження схеми. Так, при навантаженні схеми у вигляді струмового реле захисту нульової послідовності  $k=1$ , в ТВК потужності і енергії  $k=2$  або 3 відповідно до кількості вимірювальних елементів вимірювача потужності чи лічильника електроенергії.

З метою здійснення аналізу і оцінювання похибок вимірювання трифазних струмів високовольтних електромереж, виходячи з представленої на рис. 3 схеми, керуючись роботою [4], понерядно розглянемо загальну модель визначення похибки перетворення інформації про струм в зазначених вимірювальних схемах.

Схему вимірювального перетворення струму (рис. 3), вхідні та вихідні сигнали якої можна описати комплексними матрицями-векторами

$$[I_{\text{вх}}] = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, \quad [I_{\text{вих}}] = \begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_k \end{bmatrix},$$

представимо як послідовне з'єднання трьох модулів (рис. 4).

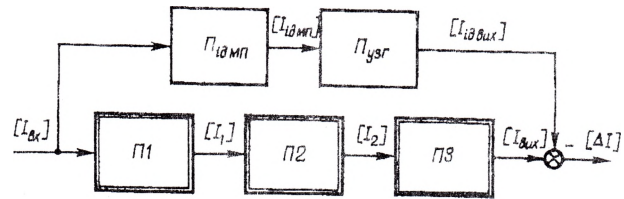


Рис. 4

Модуль П1 характеризує схему ввімкнення первинних обмоток фазних ТС і є лінійним перетворенням струмів електромережі  $[I_{\text{вх}}]$  в первинні струми ТС  $[I_1]$

$$[I_1] = [M1] \cdot [I_{\text{вх}}],$$

де  $[I_1]$  — матриця-вектор розміру  $p$ , що дорівнює кількості ТС в групі;  $[M1]$  — матриця розміром  $p \times 3$ .

Модуль П2 віддзеркалює реальне масштабне перетворення струмів в ТС окремих фаз

$$[I_2] = [M2] \cdot [I_1],$$

де  $[I_2]$  — матриця-вектор вторинних струмів ТС розміру  $p$ . Матриця перетворення  $[M2]$  є діаго-

нальної матрицею порядку  $p$ , значення елементів якої, в загальному випадку, залежать від величин усіх вимірюваних струмів і впливаючих на них зовнішніх факторів. Зважаючи на те, що більшість часу ТВК працюють в нормальних симетричних або з незначною несиметрією режимом, впливом несиметрії режиму електромережі на вторинне навантаження ТС знехтуємо і навантаження кожного ТС групи вважатимемо стабільним. За умов цих допущень діагональний елемент матриці  $[M2]$  визначається наступним виразом:

$$m2_p = (1 + f_p(I_p)) n_{\text{НОМ}}^{-1} e^{j\theta_p(I_p)},$$

де  $f_p$  і  $\theta_p$  — струмова у відносних одиницях і кутова в радіанах похибки  $p$ -го ТС, що залежать від первинного струму даної ТС  $I_p$ ;  $n_{\text{НОМ}}$  — номінальний коефіцієнт трансформації ТС.

Модуль ПЗ характеризує схему з'єднання вторинних обмоток ТС і навантаження у вигляді вимірювальних елементів засобу вимірювання і є лінійним перетворенням  $[I_2]$  у вихідні струми  $[I_{\text{вих}}]$

$$[I_{\text{вих}}] = [M3] \cdot [I_2],$$

де  $[M3]$  — матриця розміром  $k \times p$ .

В цілому, математична модель процедури перетворення струму у вимірювальній схемі має наступний вигляд:

$$[I_{\text{вих}}] = [M3] \cdot [M2] \cdot [M1] \cdot [I_{\text{вх}}] = [M_{\text{сх}}] \cdot [I_{\text{вх}}],$$

де  $[M_{\text{сх}}]$  — матриця перетворення струму у вимірювальній схемі, що має розмір  $k \times 3$ .

Ідеальне перетворення струму складається з двох операцій — ідеального масштабного перетворення  $\Pi_{\text{ідМП}}$  фазних струмів електромережі, що визначається матрицею перетворення

$$[M_{\text{ідМП}}] = \begin{bmatrix} n_{\text{НОМ}}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & n_{\text{НОМ}}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & n_{\text{НОМ}}^{-1} \end{bmatrix},$$

і перетворення  $\Pi_{\text{узг}}$ , що узгоджує фазні струми з вхідними колами засобу вимірювання у вигляді вимірювальних елементів. Матриця  $[M_{\text{узг}}]$ , що відповідає цьому перетворенню, має розмір  $k \times 3$ .

Таким чином, ідеальне перетворення струму у вимірювальній схемі можна представити співвідношенням

$$[I_{\text{ід вих}}] = [M_{\text{узг}}] \cdot [M_{\text{ідМП}}] \cdot [I_{\text{вх}}] = [M_{\text{ідсх}}] \cdot [I_{\text{вх}}],$$

де  $[M_{\text{ідсх}}]$  — матриця ідеального перетворення струму у вимірювальній схемі розміром  $k \times 3$ .

Відповідно шукана похибка перетворення трифазного струму у вимірювальній схемі складає

$$[\Delta I] = \left( |M_{\text{сх}}| - |M_{\text{ідсх}}| \right) \cdot |I_{\text{вх}}|. \quad (1)$$

Розглянемо застосування отриманої моделі для визначення похибок вимірювання струмів в схемі на рис. 1, б, для якої  $p=2$ ,  $k=3$ . Одержимо наступні значення матриць перетворення

$$[M_{\text{ідсх}}^{2\text{ТС}+3\text{ел}}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_{\text{НОМ}}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & n_{\text{НОМ}}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & n_{\text{НОМ}}^{-1} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} n_{\text{НОМ}}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & n_{\text{НОМ}}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & n_{\text{НОМ}}^{-1} \end{bmatrix};$$

$$[M_{\text{сх}}^{2\text{ТС}+3\text{ел}}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \frac{1+f_{\text{ТСА}}}{n_{\text{НОМ}}} e^{j\theta_{\text{ТСА}}} & 0 \\ 0 & \frac{1+f_{\text{ТСС}}}{n_{\text{НОМ}}} e^{j\theta_{\text{ТСС}}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1+f_{\text{ТСА}}}{n_{\text{НОМ}}} e^{j\theta_{\text{ТСА}}} & 0 & 0 \\ -\frac{1+f_{\text{ТСА}}}{n_{\text{НОМ}}} e^{j\theta_{\text{ТСА}}} & 0 & -\frac{1+f_{\text{ТСС}}}{n_{\text{НОМ}}} e^{j\theta_{\text{ТСС}}} \\ 0 & 0 & \frac{1+f_{\text{ТСС}}}{n_{\text{НОМ}}} e^{j\theta_{\text{ТСС}}} \end{bmatrix},$$

де  $f_{\text{ТСА}}$ ,  $\theta_{\text{ТСА}}$ ,  $f_{\text{ТСС}}$ ,  $\theta_{\text{ТСС}}$  — струмові і кутові похибки ТС в фазах А і С.

Виконавши математичні дії згідно з (1) і визначаючи струмову і кутову похибку перетворення струмів у вимірювальній схемі так само, як і для окремого ТС, тобто як ортогональні проекції вектора похибки на напрям струму, одержимо, що в даній схемі похибки вимірювання струмів фаз А і С будуть дорівнювати похибкам ТС цих фаз. Похибки вимірювання струму фази В  $f_{\text{ІВ}}$  і  $\theta_{\text{ІВ}}$  визначаються похибками ТС фаз А і С і в симетричному режимі роботи приєднання можуть бути розраховані за виразами

$$f_{IB} = \frac{1}{2} (f_{TCA} + f_{TCC}) + 0,0291 \frac{\sqrt{3}}{2} (\theta_{TCA} - \theta_{TCC}); \quad (2)$$

$$\theta_{IB} = \frac{1}{2} (\theta_{TCA} + \theta_{TCC}) + \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot 0,0291} (f_{TCC} - f_{TCA}); \quad (3)$$

де кутові похибки — в мінутах.

Вирази для визначення цих похибок можна одержати і з векторної діаграми вхідних і вихідних струмів цієї вимірювальної схеми, побудованої для симетричного режиму роботи електромережі (рис. 5) [2].

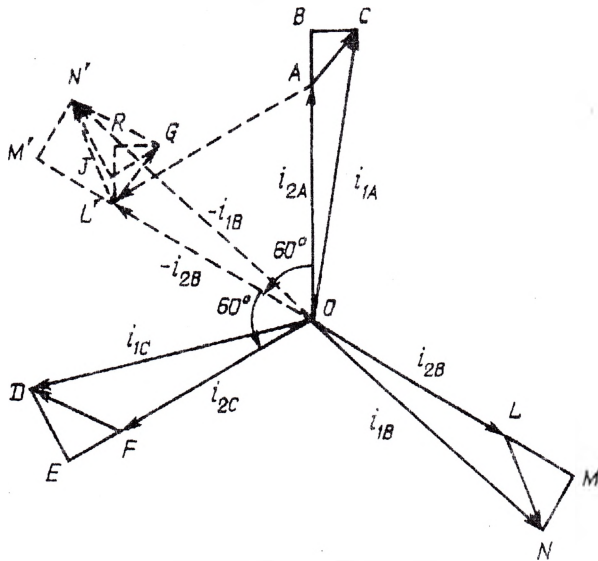


Рис. 5

Струм намагнічування ТС фази *A*, представлений на діаграмі вектором *AC*, дорівнює різниці приведенного до вторинної сторони ТС первинного і вторинного струмів цього ТС і визначає похибку вимірювання струму фази *A*. Зважаючи на те, що кут між векторами первинного і вторинного струмів ТС зазвичай не перевищує  $(1-5)^{\circ}$ , струмову похибку у відносних одиницях і кутову похибку в радіанах ТС фази *A* можна визначити з діаграми наступним чином:

$$f_{TCA} = AB/OC, \quad \theta_{TCA} = BC/OC,$$

де *BC* — перпендикуляр з кінця вектора первинного струму ТС фази *A* (*OC*) на напрямок вектора вторинного струму (*OA*). Відповідно для ТС фази *C* маємо

$$f_{TCC} = EF/OD, \quad \theta_{TCC} = DE/OD.$$

Отриманий в результаті побудови вектор *LN* визначає векторну різницю між приведеним до вторинної обмотки ТС струмом фази *B* електроме-

режі (*ON*) і струмом фази *B* на затискачах засобу вимірювання (*OL*), що є сумою вторинних струмів ТС фаз *A* і *C* з протилежним знаком, а відрізки *LM* і *MN* визначають відповідно струмову і кутову похибки вимірювання струму фази *B*. В симетричному режимі роботи електромережі, що розглядається, величини фазних струмів однакові, а кути *AOL'* і *L'OF* дорівнюють  $60^{\circ}$ . Визначені з діаграми за цих умов вирази для похибок  $f_{IB}$  і  $\theta_{IB}$  співпадають з виразами (2) і (3).

**Висновки.** 1. Отримана універсальна модель похибки вимірювання трифазного струму високовольтних електромереж групами ТС в ТВК потужності та енергії. Модель враховує кількість ТС в схемі вимірювання трифазного струму і вимірювальних елементів в засобах вимірювання, що є їх вторинним навантаженням, а також внутрішню конфігурацію схеми вимірювань.

Запропонована модель справедлива і в разі застосування її для аналізу похибок вимірювання струму в нормальному та усталених режимах групами ТС для захисту, різновид конфігурацій яких набагато ширший, ніж в ТВК потужності та енергії.

2. В ТВК, де кількість та схеми з'єднання ТС і їх вторинних навантажень у вигляді вимірювальних елементів однакові, режими роботи ТС в групі і похибки вимірювання ними фазних струмів не відрізняються від таких для окремо взятого ТС.

3. Режими роботи ТС і похибки вимірювання трифазного струму у вимірювальній схемі у складі двох ТС і їх вторинного навантаження у вигляді триелементного засобу вимірювання потужності і енергії відмінні від режимів роботи і похибок окремого ТС і тому при оцінюванні похибок вимірювання трифазного струму ця група ТС і їх навантаження повинні розглядатися як єдиний засіб вимірювання струму.

1. Багинский Л.В., Леценко В.М., Соломатин А.Ф. Аналитические исследования переходных процессов в схеме "звезда" трансформаторов тока при значительной активной нагрузке // Изв. ВУЗов. Электромеханика. — 1982. — № 2. — С. 221—227.

2. Гинайло В.А., Танкевич Е.Н., Яковлева И.В. Особенности влияния измерительных трансформаторов на учет электроэнергии в сетях напряжением 6-35 кВ // Избранные доклады Первой межд. конф. "Инвестирование в энергетику и энергосбережение: энергоэффективные технологии и оборудование, финансовые и правовые аспекты". — Ялта: МПНВП "Электромеханика". — 2005. — С. 104—110.

3. Казанский В.Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики. — М.: Энергия, 1978. — 264 с.

4. Стогний Б.С. Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения. — К.: Наук.думка, 1984. — 272 с.

Надійшла 03.08.2006