

Є. М. Танкевич¹
І. В. Яковлєва¹
Г. М. Варський¹

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ НАПРУГИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

¹Інститут електродинаміки НАН України

Запропоновано і експериментально перевірено цифрову технологію підвищення точності вимірювання векторів напруги шляхом введення поправок, які виключають систематичні похибки вимірювальних каналів. Розроблено методику підготовки вхідної інформації для коректувального модуля.

Ключові слова: вимірювальний канал, вектор напруги, математична модель, трансформатор напруги, корекція похибок вимірювання.

Вступ

Інтенсивне впровадження технології синхронізованих векторних вимірювань режимних параметрів зумовило створення просторово-розосереджених вимірювальних систем. Їх застосування піднімає на якісно новий рівень виконання функцій моніторингу, керування та захисту в енергосистемах. Забезпечення ефективного керування, зокрема, формування в режимі «on-line» керівних впливів для автоматичного запобігання порушення стійкості в енергосистемах та ліквідації асинхронного режиму, вимагає належної якості вимірювальної інформації, насамперед про вектори напруги основної гармоніки, її точності та достовірності [1].

Інформація про напругу контролюваного електроенергетичного об'єкта (ЕЕО) подається до засобу вимірювання від встановлених на об'єкті високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги (ТН), які з'єднанні з засобом вимірювання лініями зв'язку. Проведені авторами дослідження та отримані оцінки засвідчили суттєвий вплив індивідуальних метрологічних характеристик вимірювальних трансформаторів, що входять до складу каналу, параметрів ліній приєднання вторинного навантаження до групи ТН, величини та характеру цього навантаження на величину похибок вимірювання напруги ЕЕО [2]. Розрахунок сумарної векторної похибки вимірювального каналу (ВК) напруги, до складу якого входить вітчизняний високоточний засіб моніторингу «Регіна-Ч», показав, що при використанні ТН з класом точності 0,5 сумарна похибка перевищує 1 %, і в залежності від параметрів лінії зв'язку в 3...5 разів перевищує похибку пристрою «Регіна-Ч». Таким чином для отримання точної і достовірної інформації необхідно забезпечити високу наскрізну точність всього ВК.

Підвищення точності вимірювань тільки за рахунок підвищення точності окремих засобів вимірювання у складі ВК є достатньо витратним і, як показує, наприклад, досвід впровадження електронних лічильників електроенергії високих класів точності, не завжди приводить до бажаного результату. Найефективнішим способом досягнення цієї мети є введення поправок, які виключають систематичні складові похибок ВК, до виміряних значень модуля та фази вхідного сигналу. Важливість застосування функції компенсації похибок ВК засвідчив світовий досвід експлуатації систем векторних вимірювань, зокрема в США та Італії [3].

Отримання інформації, необхідної для розрахунку похибок ВК напруги і обчислення коригувальних поправок до результатів вимірювання, в умовах діючої підстанції є складним завданням. Розробка методики підготовки вхідної інформації для корекції похибок ВК напруги потребує обґрунтування переліку параметрів ВК, які необхідно визначати на ЕЕО, і рекомендацій щодо вибору оптимальних способів їх експериментального визначення для застосування на діючих підстанціях.

Мета роботи полягає у розробці способу підвищення точності ВК напруги систем керування ЕЕО, включно з методикою підготовки вхідної інформації для коректувального модуля. Підви-

щення точності вимірювання векторів напруги сприятиме ефективному функціонуванню систем керування електроенергетичних систем.

Корекція похибок ВК напруги

Підвищення точності вимірювань векторних параметрів можна досягти шляхом визначення систематичних похибок ВК і їх подальшого виключення з результатів вимірювання в програмному забезпеченні засобу вимірювання або окремому коректувальному модулі:

$$\dot{U}_{jkor} = \dot{U}_j - \Delta \dot{U}_j,$$

де \dot{U}_{jkor} — відкориговане значення вектора напруги j -ї фази; \dot{U}_j — вимірне значення вектора напруги j -ї фази; $\Delta \dot{U}_j$ — похибка ВК з вимірювання вектора напруги j -ї фази.

Запропонована в цій роботі інформаційна технологія підвищення точності вимірювання векторів напруги базується на використанні моделі ВК та його окремих компонентів для визначення поправок до результатів вимірювання.

Під час обчислення похибок ВК і на їх базі коригувальних поправок до результатів вимірювання векторів напруги доцільно застосовувати поняття трифазного ВК і його математичної моделі. Розроблена математична модель дозволяє визначати похибки вимірювання векторів трифазної напруги високовольтних ЕЕО з урахуванням впливу вхідних сигналів, індивідуальних метрологічних характеристик ТН, що входять до складу каналу, параметрів ліній приєднання вторинного навантаження до групи ТН, величини та характеру цього навантаження [4]:

$$[U_{BK}] = [M4^U] \cdot [M3^U] \cdot [M2^U] \cdot [M1^U] \cdot [U_{EEO}] = [M^U] \cdot [U_{EEO}], \quad (1)$$

де $[U_{BK}]$ — матриця-вектор напруг на вході засобу вимірювання векторів напруги; $[U_{EEO}]$ — матриця-вектор фазних напруг ЕЕО; $[M1^U]$ — топологічна матриця, що характеризує схему з'єднання первинних обмоток ТН і є лінійним перетворенням фазних напруг ЕЕО в первинні напруги ТН; $[M2^U]$ — матриця перетворення, що віддзеркалює реальне масштабне перетворення напруг в окремих ТН схеми; $[M3^U]$ — матриця, що характеризує падіння напруги в лініях зв'язку між ТН і вимірювальним засобом; $[M4^U]$ — топологічна матриця, значення елементів якої визначається схемою з'єднання вторинних обмоток ТН і вимірювальних елементів засобу вимірювання; $[M^U]$ — матриця загального перетворення напруги у ВК.

Необхідність використання моделі трифазного ВК викликана тим, що несиметрія вхідних сигналів або вторинного навантаження зумовлюють значну зміну похибок вимірювання векторів порівняно з симетричним режимом. Розрахунки за моделлю показують, що зміна первинної напруги або вторинного навантаження однієї з фаз впливає на похибки вимірювання напруги інших фаз, причому величина і характер цього впливу для кожної з фаз різні. В наведеному в роботі [4] прикладі суттєво несиметричне навантаження трифазної групи ТН приводить до того, що похибки вимірювання фазних напруг мають різні знаки, різниця похибок по напрузі перевищує 1 %, а кутівих — 40 мін.

В умовах ЕЕО між ТН і засобом вимірювання може бути прокладено декілька, в загальному випадку n , послідовно з'єднаних кабелів, які відрізняються як параметрами самих кабелів, так і струмом, який протікає в них. Величина останнього залежить від вторинного навантаження, яке живиться по цьому кабелю. Узагальнено вторинне навантаження необхідно задавати опорними, приєднаними як до фазних, так і до міжфазних напруг (рис. 1).

Математична модель похибки трифазного ВК напруги має бути адаптована до умов конкретного ЕЕО в спосіб, що враховує падіння напруги в усіх послідовно з'єднаних кабелях від вторинних затискачів ТН до засобу вимірювання і схему з'єднання вторинного навантаження. Для цього матрицю $[M3^U]$ у виразі (1) слід обчислювати як добуток n матриць, що характеризують

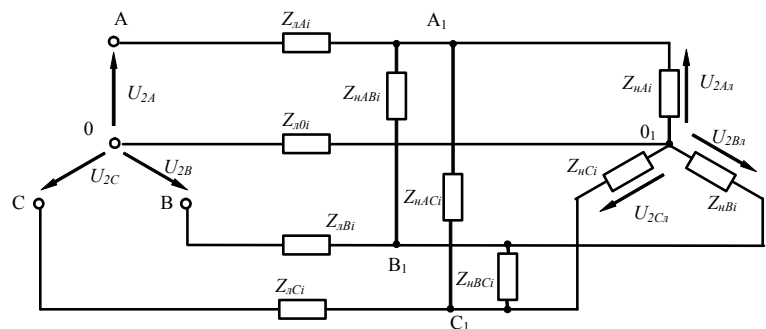


Рис. 1. Схема навантаження ділянки кабелю

падіння напруги в n послідовних ділянках вторинного кола у напрямку від ТН до засобу вимірювання:

$$[M3^U] = [M3^U_n] \cdots [M3^U_i] \cdots [M3^U_2] \cdot [M3^U_1], \quad (2)$$

де $1, 2, \dots, i, \dots, n$ — номери послідовних ділянок вторинного кола у напрямку від ТН до засобу вимірювання.

Узагальнено процедуру введення поправок до результатів вимірювання векторів напруги можна представити як послідовність таких кроків:

— з використанням математичної моделі ВК (1) визначення коригувальних поправок, які враховують систематичні похибки ВК по модулю f та куту δ , для заданого значення вимірюваного сигналу;

— введення поправок до результатів вимірювання векторів напруги, причому коригуванню підлягають як величина діючого значення напруги U , так і фаза φ сигналу:

$$U_{kor} = U(1-f), \quad \varphi_{kor} = \varphi - \delta.$$

Структура корегувального модуля і алгоритм введення поправок будуть найпростішими у випадку, коли залежності похибок ВК і визначених на їх основі коригувальних поправок від величини вхідного сигналу обчислюються заздалегідь за відомими моделями ВК з урахуванням робочого діапазону вхідних сигналів, характеристик ТН, параметрів ліній зв'язку, навантаження тощо. Ці залежності вводять в програмний модуль коригування результатів вимірювання.

Спосіб виконання процедури введення поправок залежить від функціональних можливостей засобу вимірювання у складі каналу. Найефективнішим є введення поправок на етапі вимірювання векторів напруг ЕЕО в засобі вимірювання. Також можливо виконувати постійне автоматичне введення поправок до виміряних значень напруг в окремому блоці корекції на виході засобу вимірювання. Введення поправок може виконуватись і в режимі off-line, тобто при використанні вимірювальної інформації, зокрема під час аналізу причин виникнення аварійного режиму, визначення місць короткого замикання, втрат на корону та інше.

Підготовка вхідної інформації для коректувального модуля

Обчислення коригувальних поправок з використанням математичної моделі ВК потребує визначення на об'єкті таких характеристик ВК напруги та його окремих компонентів:

— схеми з'єднання елементів ВК, а саме приєднання групи ТН до ЕЕО, з'єднання вторинних обмоток групи ТН, каналів зв'язку та вторинного навантаження — ці схеми визначають значення топологічних матриць $[M1^U]$ і $[M4^U]$ у математичній моделі ВК (1);

— величини похибок фазних ТН за напругою та кутом, які визначають значення матриці $[M2^U]$, в залежності від первинної напруги та вторинного навантаження;

— схеми та величини вторинного навантаження ТН в цілому, які застосовують при визначенні похибок ТН;

— параметрів лінії зв'язку між ТН і засобом вимірювання, а саме опорів послідовно з'єднаних n кабелів від ТН до засобу вимірювання, які визначають падіння напруги і використовуються при розрахунку матриці $[M3^U]$ за виразом (2);

— схеми та величини вторинного навантаження, приєданого до кожного з n кабелів для обчислення струмів в кабелях в розрахунку падіння напруги в них.

Точність ВК напруги в значній мірі визначається похибками ТН, які залежать від конструктивних параметрів ТН, магнітних характеристик матеріалу осердя, величини та форми первинних сигналів, параметрів вторинного навантаження, температури навколишнього середовища, терміна експлуатації ТН тощо. Інформацію про похибки ТН можна отримати або розрахунком за математичною моделлю ТН з використанням попередньо визначених параметрів моделі, або за результатами його повірки.

Математичні моделі ТН будують зазвичай на базі схем заміщення ТН. Індуктивні ТН на напругу 110...750 кВ виконують за каскадною схемою і при побудові їх схеми заміщення кожний стрижень з обмотками розглядається як окремий однофазний триобмотковий ТН. Інформація про геометричні параметри елементів осердя ТН, параметри обмоток, їх геометричні розміри, яка необхідна для обчислення параметрів схеми заміщення може бути одержана з технічної документації на тип ТН. Однак вона не буде враховувати особливості виконання і магнітного стану саме цього ТН, що важливо при визначенні його похибок в нормальних режимах роботи. Ві-

домо, що похибки різних ТН одного класу точності і навіть одного типу можуть значно відрізнятися, залишаючись в заданих класом точності межах. Для точного визначення похибок ТН необхідно експериментально визначити ВА-характеристику цього ТН, що в умовах діючої підстанції досить складно або взагалі неможливо. Експериментальне визначення всіх необхідних для точного обчислення похибок параметрів схеми заміщення ємнісного ТН, які встановлюють на високовольтних ЕЕО, теж дуже складне завдання. Тому інформацію про похибки ТН доцільно отримувати за результатами перевірки ТН. Сучасні засоби перевірки та відповідна нормативна документація дозволяють визначати їх на місці експлуатації.

Згідно з нормативними документами (ГОСТ 8.216-88) похибки ТН за напругою та кутом при перевірці визначають, коли значення первинної напруги 80, 100 і 120 % від номінального значення за потужності вторинного навантаження $0,25 S_{nom}^* (U_1/U_{nom})^2$ та $S_{nom}^* (U_1/U_{nom})^2$ і номінальному коефіцієнті потужності для кожного значення первинної напруги: S_{nom} — номінальне значення потужності ТН в цьому класі точності; U_1 — значення первинної напруги, яка подана на ТН; U_{nom} — номінальне значення первинної напруги ТН. Залежності похибок ТН від величини вторинного навантаження мають лінійний характер.

В роботі [5] запропоновано спосіб визначення з достатньою для практики точністю похибок ТН за різних значень навантаження, за величиною та коефіцієнтом потужності, за відомими в результаті вимірювань похибками ТН при х. х. та номінальному навантаженні. За умови реального навантаження ТН Z його комплексну відносну похибку $\gamma_z = f_z + j\delta_z$ можна знайти за комплексною відносною похибкою х. х. $\alpha = f_0 + j\delta_0$ та комплексною відносною похибкою ТН $\gamma_{nom} = f_{nom} + j\delta_{nom}$ за умови номінального навантаження Z_{nom} :

$$\dot{\gamma}_z = \dot{\alpha} + \frac{Z_{nom}}{Z} (\dot{\gamma}_{nom} - \dot{\alpha}).$$

Номінальне вторинне навантаження Z_{nom} розраховують за значеннями номінальної потужності вторинного навантаження S_{nom} і номінальною вторинною напругою U_{nom} . Кут φ_{nom} відповідає $\cos \varphi_{nom} = 0,8$. За неможливості виміряти безпосередньо похибки f_0 і δ_0 при х. х. їх визначають за похибками при нижній границі допустимого діапазону потужності вторинного навантаження, тобто за навантаження 0,25 номінального і похибками за номінального навантаження.

Результатом проведених досліджень стала методика визначення параметрів первинних ВК векторів напруги для обчислення поправок до результатів вимірювання. Методика включає перелік параметрів каналів, які необхідно визначати на діючих підстанціях, способи їх вимірювання, рекомендації з обробки результатів вимірювання та їх представлення як вхідної інформації блоку корекції.

Експериментальна перевірка

Виконано математичний експеримент з моделювання введення поправок у ВК напруги з відомими за результатами перевірки метрологічними характеристиками ТН типу НКФ-110-57, параметрами лінії зв'язку та суттєво несиметричним навантаженням [4]. Похибки визначення метрологічних характеристик ТН та опору лінії були взяті такими, що мають випадковий характер і не перевищують 0,2 від встановлених стандартами допустимих меж похибок трансформатора. З використанням моделі ВК були обчислені вектори поправок і отримано відкориговані значення вимірюваних сигналів — векторів фазних напруг. Порівняння обчислених похибок вимірювання векторів напруг до і після коригування наведені в таблиці.

Результати моделювання введення поправок до вимірюваних векторів фазних напруг

| Фаза | Струм навантаження, А | Виміряні похибки ТН | | Обчислені похибки ВК | | | | | |
|------|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|------------------------|----------------|----------------------|----------------|
| | | Похибка за напругою, % | Кутлова похибка, мін | Сумарна векторна похибка, % | | Похибка за напругою, % | | Кутлова похибка, мін | |
| | | | | без корекції | після корекції | без корекції | після корекції | без корекції | після корекції |
| А | 1,33 | 0,08 | 10,8 | 0,907 | 0,22 | -0,56 | -0,13 | 24,5 | 6,1 |
| В | 0,37 | -0,36 | -8,5 | 0,63 | 0,19 | -0,43 | 0,09 | -16,2 | -5,6 |
| С | 0,6 | 0,37 | 10,3 | 0,75 | 0,18 | 0,45 | 0,11 | 20,7 | -4,6 |

Висновки

Теоретично обґрунтовано і експериментально доведено можливість та доцільність підвищення точності вимірювання векторів напруги шляхом введення до результатів вимірювання поправок, які виключають систематичні похибки ВК. Розроблено цифрову технологію корекції похибок ВК та методику визначення параметрів первинних вимірювальних каналів векторів напруги для обчислення поправок до результатів вимірювання. Реалізація розробленого підходу дозволяє значно (більше ніж в 2 рази) підвищити точність вимірювань векторів напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогний Б. С. Мониторинг электроэнергетических объектов и режимов работы электроэнергетических систем / Б. С. Стогний, М. Ф. Сопель, Ю. В. Пилипенко // *Праці ІЕД НАНУ : спецвипуск*. — 2010. — С. 53—56.
2. Танкевич Є. М. Вплив компонентів вимірювального каналу на похибки вимірювання векторів напруги / Є. М. Танкевич, Г. М. Варський, І. В. Яковлева // *Технічна електродинаміка*. — 2011. — № 6. — С. 41—47.
3. Wide area monitoring in the Italian power system: architecture, functions and experiences / D. Cirio, D. Lucarella, G. Giannuzzi and F. Tuosto // *European Transactions on Electrical Power, Euro. Trans. Electr. Power* 2011; 21:1541—1556 Published online 30 December 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).
4. Яковлева І. В. Математичне моделювання каналів вимірювання векторів напруги в системах керування електроенергетичних об'єктів / І. В. Яковлева, Є. М. Танкевич, Г. М. Варський // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. — 2012. — № 1. — С. 58—61.
5. Копшин В. В. Определение погрешностей нагруженных трансформаторов напряжения / В. В. Копшин // *Измерительная техника*. — 1978. — № 211. — С. 53—54.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.11.2015

Танкевич Євгеній Миколайович — д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу автоматизації електричних систем;

Яковлева Інна Всеволодівна — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу автоматизації електричних систем, e-mail: ivya@ied.org.ua;

Варський Григорій Мстиславович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу автоматизації електричних систем, e-mail: gregvar@ukr.net.

Інститут електродинаміки НАН України, Київ

Ye. M. Tankevych¹
I. V. Yakovlieva¹
G. M. Varskyi¹

Increasing the Accuracy of Voltage Measuring Channels of Electrical Power Object Control Systems

¹Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine

The digital procedure of increasing the accuracy of measurement of voltage phasors by introducing corrections that exclude the systematic errors of measurement channels has been offered and experimentally tested. The methodology for the preparation of input information to the correction module has been developed.

Keywords: measuring channel, voltage phasor, mathematical model, voltage transformer, correction of measuring errors.

Tankevych Yevhenii M. — Dr. Sc. (Eng.), Senior Scientist, Leading Staff Scientist of the Department of Electrical Systems Automation;

Yakovlieva Inna V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Scientist, Senior Staff Scientist of the Department of Electrical Systems Automation, e-mail: ivya@ied.org.ua;

Varskyi Hryhorii M. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Staff Scientist of the Department of Electrical Systems Automation, e-mail: gregvar@ukr.net

Е. Н. Танкевич¹
И. В. Яковлева¹
Г. М. Варский¹

Повышение точности измерительных каналов напряжения систем управления электроэнергетических объектов

¹Институт электродинамики НАН Украины

Предложена и экспериментально проверена цифровая технология повышения точности измерения векторов напряжения путем введения поправок, исключающих систематические погрешности измерительных каналов. Разработана методика подготовки входной информации для корректирующего модуля.

Ключевые слова: измерительный канал, вектор напряжения, математическая модель, трансформатор напряжения, коррекция погрешностей измерения.

Танкевич Евгений Николаевич — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела автоматизации электрических систем;

Яковлева Инна Всеволодовна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела автоматизации электрических систем, e-mail: ivya@ied.org.ua;

Варский Григорий Мстиславович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела автоматизации электрических систем, e-mail: gregvar@ukr.net