УДК 621.317.3

І.В. Яковлєва
Інститут електродинаміки НАН України

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Ó Яковлєва І.В., 2009

Розроблена математична модель похибки високовольтного вимірювального каналу реактивної потужності, яка враховує вплив на величину похибки конфігурації каналу, індивідуальних метрологічних характеристик засобів вимірювань, робочих умов вимірювань і режиму роботи електричної мережі.

The mathematical model of error of high-voltage measuring channel of reactive power, which takes into account influence of channel's configuration, individual metrological performances of measuring devices, measuring operating conditions and the electric network mode on value of error, is developed.

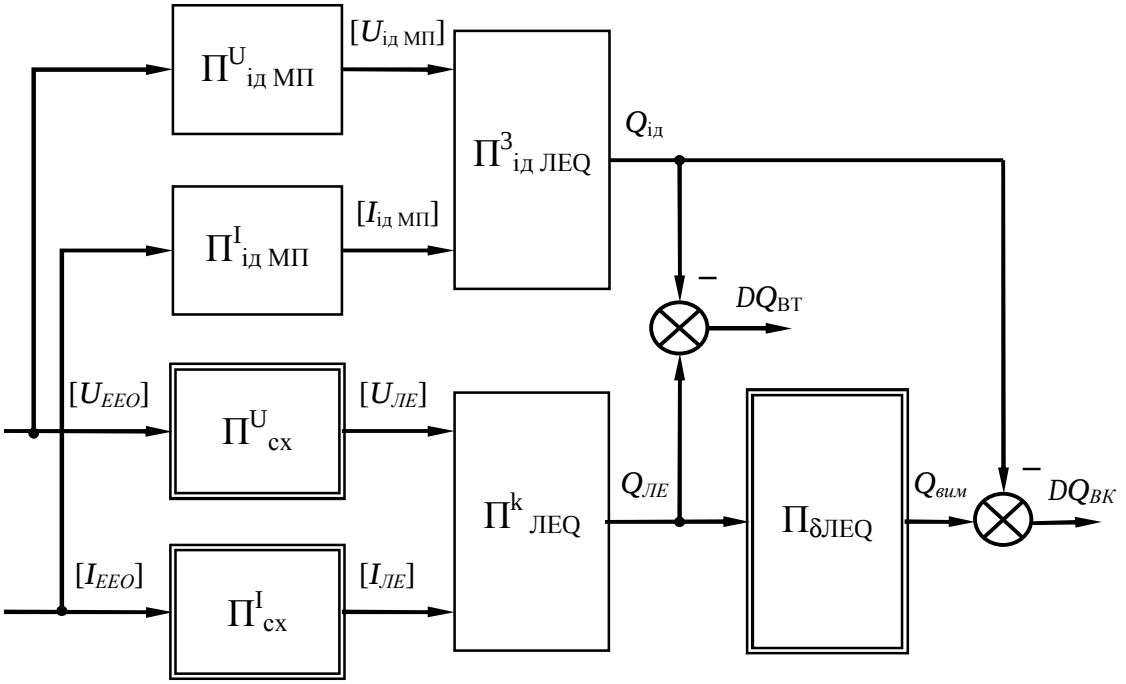
Постановка проблеми. Своєчасне одержання достовірної інформації про параметри режиму, зокрема і реактивну потужність, надзвичайно важливе для виконання оптимального керування в енергосистемах, забезпечення якості електроенергії, зменшення втрат електроенергії і вирішення багатьох інших завдань. Труднощі вимірювання реактивної потужності пов'язані, насамперед, з відсутністю єдиного підходу до визначення реактивної або інших неактивних складових повної потужності при несинусоїдальних сигналах і несиметричних режимах. Для трифазних ланцюгів в несиметричних режимах різноманіття неактивних складових і формул для їх визначення зростає ще більше, що пояснюється відсутністю єдиного загальноприйнятого визначення повної потужності для багатофазних електричних ланцюгів [1]. Тому різниця показів вимірювальних засобів, що використовують різні підходи до обчислення реактивної потужності, може становити декілька процентів у несинусоїдальних режимах, а в несиметричних режимах вимірювані значення реактивної потужності можуть відрізнятися в два рази [2]. Однак і за умови симетричних синусоїдальних вхідних сигналів актуальною є проблема забезпечення необхідної точності вимірювання реактивної потужності. Як показують дослідження, за несприятливого поєднання деяких факторів, що впливають на похибки вимірювання потужності та енергії високовольтних електроенергетичних об'єктів (ЕЕО), сумарна похибка вимірювального каналу (ВК) може значно (в десятки разів) перевищувати похибку окремих засобів вимірювання в його складі [3].

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Сучасний стан вимірювальної техніки та нормативного забезпечення дає змогу підвищити точність вимірювання за рахунок введення поправок до результатів вимірювання [4, 5]. Основою такого підходу має бути математична модель похибки ВК, а його ефективність залежить від повноти врахування в моделі факторів, що мають місце в експлуатації і впливають на точність вимірювань реактивної потужності. Проведені дослідження і оцінювання похибки ВК активної потужності показали важливість врахування впливу структури вимірювальної схеми і можливих розбіжностей у значеннях метрологічних характеристик засобів вимірювання окремих фаз на остаточні результати вимірювання [6]. Вплив цих факторів або зовсім не враховується, або ж враховується лише приблизно в сучасних методиках виконання вимірювання реактивної потужності [5].

Задача досліджень. Метою роботи є розробка такої моделі ВК реактивної потужності, яка дозволяє врахувати склад і структуру ВК, індивідуальні метрологічні характеристики засобів вимірювання, робочі умови вимірювань і режим роботи контрольованої мережі.

Виклад основного матеріалу. Вимірювання параметрів режиму і облік електроенергії у високовольтних ЕЕО здійснюється вимірювальними комплексами, що складаються з груп вимірювальних трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН), ліній зв'язку і вимірювальних приладів. Структура комплексу визначається типами засобів вимірювання, що входять до його складу, їх кількістю, класом напруги і способом виконання нейтралі електромережі. У складі такого комплексу функціонально можна виділити ВК окремих параметрів режиму, зокрема реактивної потужності. Такий ВК, як і ВК активної потужності, складається з трьох частин: схеми вимірювання трифазної напруги, схеми вимірювання трифазного струму і трифазного вимірювального приладу, наприклад, багатофункціонального лічильника електроенергії.

Зважаючи на подібність цих ВК, структурну схему визначення похибки ВК реактивної потужності можна побудувати аналогічно до такої самої схеми для ВК активної потужності [6] (рисунок).



Структурна схема визначення похибки вимірювання реактивної потужності

Модулі $\Pi^{I}_{\text{сх}}$ і $\Pi^{U}_{\text{сх}}$ характеризують багатоопераційні процедури вимірювальних перетворень трифазних струму $[I_{EEO}]$ і напруги $[U_{EEO}]$ ЕЕО в k вхідних струмів $[I_{ЛЕ}]$ та напруг $[U_{ЛЕ}]$ вимірювального приладу, k=2 або 3 залежно від кількості вимірювальних елементів приладу. Зазвичай такі вимірювальні перетворення виконуються групами з двох або трьох фазних ТС і групами з трьох однофазних ТН (трифазного ТН), з'єднаних за схемою зірки, або двох однофазних ТН, з'єднаних за схемою неповного трикутника. Процедури вимірювальних перетворень струмів та напруг обумовлюють амплітудні f_{Ij}, f_{Uj} і кутові q_{Ij}, q_{Uj} похибки трансформації струмів і напруг, що призводять до похибок виміру потужності.

У цій моделі використано формалізовані математичні описи вимірювання вхідних сигналів як послідовності операцій перетворення інформації в ВК [6]. Наприклад, вимірювання трифазної напруги в ВК можна подати як послідовність чотирьох операцій і записати так:

$$[U_{ЛЕ}] = [M4^{U}][M3^{U}][M2^{U}][M1^{U}][U_{EEO}] = [M^{U}_{cx}][U_{EEO}]$$

де матриці $[M1^{U}]$÷$[M4^{U}]$ характеризують індивідуальні метрологічні характеристики всіх ТН групи, конфігурацію схеми з'єднання трансформаторів і вимірювальних елементів лічильника, що є їх вторинним навантаженням, режими роботи ТН в групі, падіння напруги в лініях приєднання вторинного навантаження до групи ТН, $[M^{U}_{cx}]$ – матриця загального перетворення напруги у ВК.

За такого підходу враховано той факт, що умови роботи і похибки вимірювальних трансформаторів в складі трифазної групи, відрізняються від умов роботи і похибок окремого трансформатора.

Роботу вимірювача потужності можна описати як послідовність двох операцій: першої, зображеної на схемі блоком $П^{k}_{ЛЕQ}$, яка моделює алгоритм обчислення реактивної потужності з урахуванням кількості вимірювальних елементів приладу і другої, блок $П_{\delta ЛЕQ}$, яка відображає вплив метрологічних характеристик приладу на результат вимірювання.

Реактивна потужність на виході ВК дорівнює

$$Q_{вим} = Q_{ЛЕ}(1 + d_{ЛЕ}),$$

де $Q_{ЛЕ}$ – потужність подана на вхід приладу; $d_{ЛЕ}$ – похибка приладу.

Гілка ідеального вимірювання потужності в структурній схемі визначення похибки побудована, враховуючи міркування, що найточніше вимірювання потужності виконується каналом, що складається з трьох ТС, трьох ТН і трьохелементного приладу і представлена трьома модулями: ідеальним масштабним перетворенням $П^{U}_{ід\ МП}$ фазних напруг електромережі, ідеальним масштабним перетворенням $П^{I}_{ід\ МП}$ фазних струмів електромережі і $П^{3}_{ід\ ЛЕQ}$, що моделює алгоритм обчислення реактивної потужності в трьохелементному вимірювачі.

Отже, повна похибка вимірювання реактивної потужності в ВК дорівнює

$$DQ_{ВК} = Q_{вим} - Q_{ід} = Q_{ЛЕ}(1 + d_{ЛЕ}) - Q_{ід} = DQ_{ВТ} + d_{ЛЕ}\,Q_{ЛЕ}. \quad (1)$$

Складова $DQ_{ВТ}$ визначається метрологічними характеристиками ТС і ТН, їх кількістю і схемами з'єднання, кількістю вимірювальних елементів приладу, навантаженням вимірювальних трансформаторів, параметрами ліній зв'язку, тощо, тобто враховує всі джерела похибок окрім інструментальної похибки вимірювача.

Якщо перейти у виразі (1) до відносних похибок, то можна записати:

$$d_{ВК} = d_{ВТ} + d_{ЛЕ}.$$

Розглянемо докладніше визначення складової $d_{ВТ}$ в симетричних режимах роботи мережі, які є найтривалішими в більшості точок обліку, за умови синусоїдальних вхідних сигналів

$$d_{ВТ} = \frac{Q_{ЛЕ} - Q_{iд}}{Q_{iд}}.$$

У цих режимах результат обчислення реактивної потужності в усіх засобах вимірювання, незалежно від алгоритмів, що в них використовуються, буде однаковим і дорівнюватиме

$$Q_{ЛЕ} = \sum_{j=1}^{k} U_{ЛЕj} I_{ЛЕj} \sin j_j \quad (2)$$

де $I_{ЛЕj}, U_{ЛЕj}$ – струм і напруга, які подано на j-й вимірювальний елемент приладу; j_j – кут між $U_{ЛЕj}$ і $I_{ЛЕj}$.

Враховуючи (2) і зневажаючи членами другого порядку малості, виразимо значення похибки $d_{ВТ}$ через похибки трансформації струмів і напруг

$$d_{ВТ} = \sum_{j=1}^{k} \frac{Q_j}{Q_{iд}} \left(f_{Ij} + f_{Uj} - (q_{Ij} - q_{Uj})\, ctg\, j_j\right), \%, \quad (3)$$

де Q_j – потужність, що вимірюється j-м вимірювальним елементом приладу.

Цю похибку можна представити, як суму двох складових: $d_{ТС}$, що зумовлена схемою трансформації трифазного струму, і $d_{ТН}$ – схемою трансформації трифазної напруги:

$$d_{ТС} = \sum_{j=1}^{k} \frac{Q_j}{Q_{iд}} \left(f_{Ij} - q_{Ij} ctg\, j_j\right), \%, \qquad d_{ТН} = \sum_{j=1}^{k} \frac{Q_j}{Q_{iд}} \left(f_{Uj} + q_{Uj} ctg\, j_j\right), \%. \quad (4)$$

Дослідимо визначення цих похибок залежно від кількості вимірювальних елементів приладу. На кожний вимірювальний елемент трьохелементного трифазного приладу, незалежно від коефіцієнта потужності навантаження, подається однакова потужність, а саме третина реактивної

потужності приєднання. Враховуючи це, вирази (4) для трьохелементного приладу в цьому режимі можна записати так:

$$d_{TC} = \frac{f_{IA} + f_{IB} + f_{IC}}{3} - ctg\,j \cdot \frac{q_{IA} + q_{IB} + q_{IC}}{3}, \%, \quad (5)$$

$$d_{TH} = \frac{f_{UA} + f_{UB} + f_{UC}}{3} + ctg\,j \cdot \frac{q_{UA} + q_{UB} + q_{UC}}{3}, \%, \quad (6)$$

де f_{IA}, q_{IA}, f_{IB}, q_{IB}, f_{IC}, q_{IC}, f_{UA}, q_{UA}, f_{UB}, q_{UB}, f_{UC}, q_{UC} – амплітудні похибки в процентах та кутові похибки в радіанах трансформації фазних струмів та напруг; j – кут навантаження.

Зовсім інша залежність спостерігається для двохелементного приладу, на вхід якого подають міжфазні напруги U_{AB} і U_{CB} та два фазні струми I_A и I_C. За симетричного режиму роботи приєднання маємо такі значення потужностей, що вимірюються окремими елементами приладу:

$$Q_1 = U \cdot I \cdot \sin(j + 30°), \qquad Q_2 = U \cdot I \cdot \sin(j - 30°),$$

де U – величина міжфазної напруги, I – величина фазного струму, $j_1 = j + 30°$, $j_2 = j - 30°$.

Враховуючи, що реактивна потужність приєднання дорівнює $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin j$, одержимо складові похибки d_{BT} за виразами (4) для двохелементного приладу:

$$d_{TC} = \frac{f_{IA} + f_{IC}}{2} + \frac{q_{IA} - q_{IC}}{2 \cdot \sqrt{3}} + ctg\,j \cdot \left(\frac{f_{IA} - f_{IC}}{2 \cdot \sqrt{3}} - \frac{q_{IA} + q_{IC}}{2} \right) \%, \quad (7)$$

$$d_{TH} = \frac{f_{UAB} + f_{UCB}}{2} - \frac{q_{UAB} - q_{UCB}}{2 \cdot \sqrt{3}} + ctg\,j \cdot \left(\frac{f_{UAB} - f_{UCB}}{2 \cdot \sqrt{3}} + \frac{q_{UAB} + q_{UCB}}{2} \right) \%, \quad (8)$$

де f_{UAB}, q_{UAB}, f_{UCB}, q_{UCB} – амплітудні та кутові похибки трансформації міжфазних напруг.

Наведемо результати прикладу обчислення похибки ВК з двохелементним вимірювачем з використанням виразів (7) і (8). Струмові і кутові похибки ТС у фазах А і С дорівнюють: f_{TCA} = –0,43%; q_{TCA} = 18,5′; f_{TCC} = –0,34%; q_{TCC} = 17′. Похибки ТН дорівнюють: f_{THAB} = 0,21%; q_{THAB} = 11,7′; f_{THCB} = 0,08%; q_{THCB} = 7,3′. Похибкою вимірювача і падінням напруги в лініях приєднання вторинного навантаження до групи ТН знехтуємо. Тоді залежно від кута навантаження одержимо такі значення похибки ВК: j = –20°, d_{BK} = 0,36 %; j = 30°, d_{BK} = –0,66 %; j = 60°, d_{BK} = -0,4 %. Ці значення збігаються з одержаними шляхом чисельного моделювання в середовищі Mathcad роботи даного ВК.

Висновки. Запропонована математична модель дає змогу визначати похибку ВК реактивної потужності з урахуванням впливу на неї режиму роботи ЕЕО, робочих умов вимірювань, структури ВК і індивідуальних метрологічних характеристик засобів вимірювання, що входять до його складу. Це створює підґрунтя для підвищення точності виміру реактивної потужності шляхом введення до результатів вимірювання поправок, що враховують похибки ВК і обчислюються з використанням наведеної моделі.

1. Баланс энергий в электрических цепах / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с. 2. Стогний Б.С., Танкевич Е.Н., Яковлева И.В. О подходах к определению характеристик энергопотребления в условиях несимметричных и несинусоидальных режимов // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". Спец. вип.: Доп. 1-ї Міжнар. наук.-практ. конф. "Проблеми економії електроенергії". – 1998. – С. 153–156. 3. Загорский Я.Т., Комкова Е.В. Границы погрешности измерений при расчетном и техническом учете электроэнергии // Электричество. – 2001. – № 8. – С. 14–18. 4. Танкевич Є.М., Яковлєва І.В. Вплив фазової складової похибок компонентів вимірювальних комплексів на точність вимірювання потужності та обліку електричної енергії // Энергетика и электрификация. – 2001. – № 6. – С. 15–20. 5. Кількість електричної енергії та електрична потужність. Типова методика виконання вимірювань МВУ 031/08-2007. – К.: ГРІФРЕ, 2007. – 97 с. 6. Стогній Б.С., Яковлєва І.В., Танкевич Є.М. Вплив структури і метрологічних характеристик компонентів трифазного вимірювального каналу потужності на математичну модель його похибки // Енергетика та електрифікація. – 2007. – № 8. – С. 25–29.