

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Ференсовича Романа Ярославовича** на тему **«Режими роботи та захист трансформаторів струму за обривів вторинних кіл»**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Актуальність теми дисертації

Трансформатори струму (ТС) є важливим елементом кіл вимірювання, релейного захисту й автоматики (РЗА) в електричних мережах. Їм доводиться працювати як за усталених, так і перехідних режимів роботи електричних мереж, що характеризуються відповідними особливостями протікання електромагнітних процесів. Також ТС призначені для відокремлення низьковольтних вторинних кіл від первинних кіл високої напруги. Проте під час обривів у вторинних колах ТС виникають високовольтні імпульси напруги, небезпечні для обладнання вторинних кіл, а також для обслуговуючого персоналу електроустановок.

На сьогодні цим небезпечним режимам роботи ТС приділяється недостатньо уваги. Розроблені методи і заходи захистів від індукованих перенапруг в колах з ТС містять ряд недоліків. Враховуючи відсутність ґрунтовних досліджень режимів роботи ТС за обриву кіл, під'єднаних до вторинних обмоток цих трансформаторів, та практичну відсутність пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів, проблема пошкодження ТС та обладнання їх вторинних кіл, а також ураження персоналу в діючих електроустановках від дії перенапруг є актуальною.

Метою дисертаційної роботи Ференсовича Р. Я. є дослідження режимів роботи та створення системи захисту трансформаторів струму в електричних мереж від перенапруг при обривах вторинних кіл ТС, що і визначає її актуальність.

Результати, що сприяють досягненню поставленої мети, автор отримав, виконуючи дослідження в рамках науково-дослідної роботи «Аналіз перенапруг в електричних мережах та режими роботи вимірних трансформаторів струму й напруги в цих умовах» (№ держреєстрації 0115U004699, 2015 – 2017 р.р.), а також госпдоговірної роботи № 738 для ПрАТ «Львівобленерго» «Дослідження причин пошкодження електромагнітних трансформаторів напруги типу НКФ-110 кВ та розробка рекомендацій з підвищення їх надійності та безпеки експлуатації» (2017 – 2018 р.р.). Автор брав участь у цих роботах як виконавець.

Короткий аналіз змісту дисертації і відповідність його поставленим задачам

В *першому розділі* виконано аналіз результатів досліджень режимів роботи ТС за обриву кола вторинної обмотки цих трансформаторів, а також опис відомих пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів.

Розглянуто конструкції та технічні характеристики ТС з замкнутим магнітопроводом та особливості режимів роботи цих трансформаторів у

сучасних мережах 6 – 1150 кВ промислової частоти. Встановлено, що вимірювальні ТС з замкнутим магнітопроводом, незважаючи на їх високу надійність та експлуатаційну придатність, мають і суттєві недоліки. Дана критична оцінка відомих заходів щодо покращення експлуатаційних характеристик ТС з замкнутим магнітопроводом, зокрема – зменшення впливів перехідних процесів в ТС та електромережах промислової частоти на точність вимірювання струму і на хибну роботу пристроїв РЗА. Відмічено також вищу експлуатаційну надійність та пожежобезпеку ТС з елегазовою ізоляцією порівняно з паперово-оливною ізоляцією. Розглянуто промислові конструкції та принцип роботи нетрадиційних ТС.

В *другому розділі* запропоновано метод оцінювання максимальних амплітуд перенапруг на виводах вторинної обмотки ТС за обриву його вторинного кола, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг без необхідності створення громіздких розрахункових схем ТС та моделювання характеристик намагнічування їх осердь.

Запропоновано метод оцінки максимальної амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС під час протікання в первинній обмотці синусоїдного струму. Виконано порівняльні аналітичні розрахунки координат усталених режимів роботи різних типів ТС, а також комп'ютерне моделювання таких режимів при розімкнених виводах вторинної обмотки ТС під час протікання в первинній обмотці синусоїдного струму. Проведеними розрахунками підтверджено наявність небезпечних (більше 1000 В) перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток одноступеневих ТС різних типів навіть під час протікання в їх первинних обмотках номінальних синусоїдних струмів. Відсутність ефективних серійних пристроїв для обмеження таких перенапруг з метою забезпечення експлуатаційного персоналу та захисту вторинних кіл ТС підтверджує доцільність їх розроблення та дослідження.

Третій розділ присвячено комп'ютерному моделюванню та аналізу усталених і перехідних режимів роботи одноступеневих та каскадних ТС під час розмикання їх вторинних кіл з врахуванням втрат активної потужності в осердях трансформаторів. Показано значний вплив цих втрат на рівень усталених перенапруг порівняно з режимами без врахування втрат активної потужності.

За результатами комп'ютерної симуляції усталених режимів підтверджено, що найбільші рівні усталених перенапруг порядку десятків і більше кіловольт виникають за розмикання вторинних обмоток шинних ТС кіл генераторної напруги потужних синхронних машин. Для таких ТС обґрунтовано доцільність створення та застосування спеціального захисту для обмеження цих перенапруг до рівня 1000 В. Запропоновано вирази для розрахункових функцій залежностей вторинних перенапруг від кратності первинних струмів для одноступеневих ТС за розімкнених кіл їх вторинних обмоток. За результатами виконаних розрахунків визначено типи ТС, для яких необхідно встановлювати спеціальний захист від дії цих перенапруг. Результатами досліджень перехідних процесів при обривах вторинних кіл різних типів ТС для мереж 10–750 кВ

встановлено, що у більшості випадків величини перших піків вторинних напруг значно перевищують їх усталені амплітуди. При цьому значення перших піків напруг особливо небезпечні для ізоляції ТС, а усталені напруги – для обслуговуючого персоналу підстанцій.

В *четвертому розділі* досліджено запропоновану систему захисту (СЗ) від перенапруг під час обриву вторинних кіл ТС. Вона захищає персонал служб РЗА діючих електроустановок, ізоляцію вторинної обмотки даного ТС та ізоляцію кіл струму пристроїв РЗА, вимірювання, обліку електричної енергії тощо.

В якості обмежувача перенапруг (ОПН) СЗ запропоновано застосовувати пробивний запобіжник типу ПП-А/3 вітчизняного виробника – з напругою спрацювання до 1000 В. Для проведення досліджень режимів роботи основних типів ТС з СЗ від перенапруг за обриву їх вторинних кіл розроблено відповідні розрахункові схеми з застосуванням цифрових програмних комплексів «RE» та «FASTMEAN». Результатами досліджень на цифровій моделі СЗ від перенапруг за обриву вторинних кіл струму досліджуваних типів ТС доведено ефективність її роботи та обмеження перенапруг до рівня спрацювання ОПН типу ПП-А/3. Показана доцільність, після спрацювання ОПН, додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки ТС. Комп'ютерним моделюванням та відповідними аналітичними розрахунками доведено можливість застосування для СЗ окремих типів ТС від перенапруг ОПН без іскрового проміжку, що застосовуються для захисту електрообладнання від дії грозових та комутаційних перенапруг. Проведено дослідження режимів роботи ТС з СЗ від перенапруг без застосування джерела оперативного струму для шунтування вторинної обмотки ТС. Проведеними натурними експериментами та комп'ютерним моделюванням у програмному комплексі «RE» режимів роботи СЗ на прикладі ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості ОПН підтверджено ефективність обмеження вторинних перенапруг до значень, не більших 1000 В.

Таким чином, Ференсович Р.Я., провівши сукупність наукових досліджень, спираючись на сучасні методи досліджень і технічні засоби, розв'язав поставлені ним задачі і досяг поставлену в роботі мету – дослідження режимів роботи та створення захисту трансформаторів струму електричних мереж від перенапруг, коли обриваються їх вторинні кола.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

В дисертації Ференсович Р.Я. отримав такі результати, які мають суттєву наукову новизну:

- запропоновано метод оцінювання максимальних амплітуд перенапруг на виводах вторинної обмотки трансформатора струму під час обриву його вторинного кола, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму;

- досліджено вплив втрат активної потужності в магнітопроводах трансформаторів струму на рівень максимальних перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток, що дає змогу моделювати режими трансформаторів струму під час обриву їх вторинних кіл та розраховувати значення перенапруг на вторинних виводах;

- запропоновано принципи побудови систем захисту трансформаторів струму від перенапруг під час обривів їх вторинних кіл.

Положення і висновки відносно суті проблеми, принципів і методів побудови математичних моделей в роботі обґрунтовані та базуються на законах електротехніки, теорії лінійних та нелінійних електричних кіл і методах математичного моделювання. Висновки по розділах і по роботі в цілому відповідають змісту дисертації і є об'єктивними. Можна стверджувати, що наведені в дисертаційній роботі Ференсовича Р.Я. висновки і рекомендації щодо використання результатів досліджень достатньо обґрунтовані та відповідають дійсності. Достовірність їх забезпечена коректністю використання математичного апарату та наукових положень.

Основні результати дослідження **достатньо апробовані**. Вони доповідались на науково-технічних конференціях і опубліковані в 17-ти роботах, зокрема 4 у фахових виданнях, 1 стаття у закордонному науковому періодичному журналі, 5 тез у матеріалах науково-технічних конференцій, 4 матеріали міжнародних конференцій, 3 патенти на корисні моделі. Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що в них в повному обсязі опубліковані матеріали дисертації. Автореферат дисертації відображає її зміст, ідеї та висновки. У авторефераті розкрито внесок дисертанта в даний науковий напрям, розкриті новизна розробок, теоретичні і практичні значення результатів проведених досліджень.

Практична цінність отриманих результатів

Дисертаційна робота Ференсовича Р.Я. містить як в теоретичному, так і в практичному плані нові рішення щодо моделей і методів аналізу та побудови структурних схем захисту трансформаторів струму та їх вторинних кіл від перенапруг, що виникають під час аварійного розмикання цих кіл. Зокрема, запропоновано систему захисту трансформатора струму та його вторинного кола від перенапруг, яка в якості обмежувача перенапруг містить пробивний запобіжник типу ПП-А/З та схему швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки після спрацювання обмежувача перенапруг. Результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень підтверджено ефективну роботу запропонованої системи захисту від перенапруг для основних типів трансформаторів струму, які експлуатуються в електричних мережах України.

Окремі результати роботи використовуються під час викладання навчальних дисциплін «Оптимізація режимів роботи електроенергетичних систем», «Перенапруги та координація ізоляції в електричних мережах», «Релейний захист електроенергетичних систем (ч. 1, 2)».

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в наукових та проектних організаціях (інститут «Енергомережпроект»), які займаються дослідженнями та розробкою методів і засобів аналізу режимів роботи вимірювальних трансформаторів та забезпечення їх експлуатаційної надійності.

Зауваження по роботі

1. В першому розділі є загальновідома інформація щодо ТС – їх конструкції, матеріалів, визначення режимів, тощо.

2. Автор розглядає ТС нетрадиційної конструкції, зокрема ТС з магнітним осердям з немагнітним проміжком. Така конструкція характеризується збільшенням струмової похибки трансформатора. Серед можливих способів компенсації похибок не відмічено спосіб, який оснований на програмній корекції вторинного струму і використовується в колах обліку електроенергії (п. 1.3.1).

3. Не обґрунтовано, чому ВБАХ апроксимується спрощено – двокусковою залежністю. Сучасні засоби комп'ютерного моделювання дозволяють це робити значно точніше і адекватніше (п. 2.2). Непереконливо звучить, що запропонований метод апроксимації «дозволяє швидко розраховувати амплітуди напруги ...».

4. Ефективність комп'ютерного моделювання за різних форм апроксимації ілюструється на ряді ТС (ТЛМ-10, ТПШЛ-10, ТВ-35, ТВТ-110). Хотілося б бачити якесь узагальнення, перейти від частинного до загального. Це дозволило б поширити результати дослідження на ТС, що проектуються, і формувати відповідно їх характеристики.

5. В розрахунках режимів ТС спостерігається невідповідність точності вихідних даних і точності результатів розрахунків. Наприклад, як розуміти $U_{2m} = 1542,153 \text{ В}$, $U_{2m} = 8436,255 \text{ В}$?

6. Не наведено, яка ймовірність того, що кратність первинного струму, наприклад, 10, співпадає з обривом у вторинному колі ТС.

7. На рис. 4.1 структурної схеми СЗ від перенапруг не показано заземлення клем И ТС. Це так має бути?

8. Адекватність розроблених моделей обґрунтовано, але відсутній аналіз їх на чутливість до зміни вихідних даних, зокрема форми апроксимації ВБАХ. Це варто було б зробити. Тут можна було б отримати цікаві результати.

9. Щодо загальної оцінки змісту, структури та оформлення результатів роботи. У роботі зустрічаються граматичні помилки, стилістичні неточності та описки, але кількість їх допустима. Путаються такі поняття як «величина» і «значення» (величина струму, величина потокозчеплення). Зловживається прийменниковим сполученням «за» там, де потрібно «під час», «коли».

Зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Ференсовича Р. Я.

Висновки

Зміст дисертації Ференсовича Романа Ярославовича відповідає спеціальності 05.14.02, за якою вона представлена до захисту. Дисертаційна

робота має значну наукову цінність, є закінченою науково-дослідною роботою, яка присвячена вирішенню важливої і складної проблеми для електроенергетики – покращання функціонування електричних мереж за рахунок підвищення надійності роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл шляхом використання системи захисту їх від таких режимів. Дисертаційна робота за актуальністю теми, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, новизною досліджень і практичною цінністю отриманих результатів відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами, затвердженими Постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р., № 656). Її автор, Ференсович Роман Ярославович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Завідувач кафедри електричних станцій та систем
Вінницького національного технічного університету,
доктор технічних наук, професор

П. Д. Лежнюк

