

теплоелектростанцій і теплоелектроцентралей у період до 2020 року/ РОЗПОРЯДЖЕННЯ КАБІНЕТУ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ від 8 вересня 2004 р. N 648-р. (Із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ №850-р від 18.06.2008). – Офіц. вид. – Київ. – 2008. 4. Bayne J.P., Kundur P., and Watson W. Static Exciter Control to Improve Transient Stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, pp. 1141–1146, July 1975. 5. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Std 421.5™* – 2005. 6. Performance of Three PSS for Interarea Oscillations [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_PSS-performance-of-three-pss-for-interarea-oscillations. 7. Kundur P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill. – 1994. – 813 p. 8. Kiyong Kim, Richard C. Schaefer. Tuning a PID Controller for a Digital Excitation Control System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 2, March/April 2005. 9. Konoval V. Power system dynamic stability: impact analysis of synchronous generator excitation system replacement / V. Konoval, A. Kozovyy, O. Skrypnik, A. Kuchynskyi, P. Dembitskyi // *Blackout a krajowy system elektroenergetyczny* (2014). – Poznan. – 2014. – P. 349–359. 10. www.dakar.eleks.com. 11. Synchronous Machine. *Simscape™ Power Systems™*. MathWorks MATLAB® [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html>. 12. Макаров И. М. *Линейный автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал)*. – 2-е изд., перераб. и доп. / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М. : Машиностроение, 1982. – 504 с. 13. Control System Toolbox [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/control/index.htm>

УДК 621.311

Б. В. Дмитрик, О. М. Равлик, І. О. Сабадаш, Н. О. Равлик
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних систем та мереж,
кафедра електричних станцій

ВПЛИВ РПН НА ІДЕНТИФІКАЦІЮ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ У СИЛОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ

© Дмитрик Б. В., Равлик О. М., Сабадаш І. О., Равлик Н. О., 2017

Досліджено вплив пристрою РПН на ідентифікацію виткових замикань у силових багатообмоткових трансформаторах.

Ключові слова: багатообмотковий трансформатор, виткове замикання, алгоритм ідентифікації, РПН, чутливість, селективність.

The investigation of the influence of on-load tap-changing device on the algorithm of identification of winding short circuits in multi-winding power transformers was conducted.

Keywords: multi-winding transformer, winding short circuit, algorithm of the identification, LTC device, sensitivity, selectivity.

Постановка проблеми

Сьогодні в українських електромережах експлуатується значна кількість застарілого силового обладнання, яке вже довгий час працює понад нормальний термін придатності. Особливо гострою є ця проблема стосовно силових трансформаторів, які є одними з основних елементів мережі. У зв'язку із багатьма зовнішніми та внутрішніми факторами це обладнання потребує ефективного захисту. Цю функцію на себе беруть пристрої релейного захисту[1], які повинні

селективно вимикати пошкоджене обладнання під час аварійних режимів роботи електромережі. Однак ці пристрої не завжди забезпечують достатній рівень безпеки. В [2, 3] описано особливо гостру проблему відсутності ефективного захисту від виткових замикань у силовому трансформаторі і запропоновано новий підхід до ідентифікації цих пошкоджень [4]. Описаний спосіб дає змогу ефективно захистити трансформатор від виткових замикань на цифровій основі за відсутності пристрою регулювання під напругою (РПН). Тому виникає природне запитання: як вплине наявність РПН на роботу такого захисту?

Аналіз останніх досліджень

Значна кількість силових трансформаторів, особливо у розподільчих мережах, комплектується пристроями РПН, що дає змогу без відключення трансформатора від мережі змінювати кількість витків його первинної обмотки, що призводить до зміни коефіцієнта трансформації і, як наслідок, напруг на обмотках. Це дає змогу гнучко регулювати режими роботи не лише під час сезонних, але й добових змін навантаження.

Пристрій РПН виконано в окремому відсіку баку трансформаторів з оливною ізоляцією, куди виведено відпайки додаткових витків, що підлягають перемиканню. У трансформаторах із сухою ізоляцією його реалізація не є безпечною. Якщо говорити про коефіцієнт трансформації, то РПН дає змогу регулювати його у межах $\pm 10\% \div \pm 16\%$ з кроком $1,5\% \div 2,5\%$.

Регулювати напругу за допомогою РПН можна як автоматично, так і вручну. В електричних мережах, де доволі часті стрибки навантаження та зміни режиму роботи, від автоматичного регулювання намагаються відмовитися. Тут криється основна проблема використання РПН – це часті поломки і замикання обмоток самого пристрою. Дуже великий відсоток кількості виткових замикань у трансформаторах припадає саме на відсік РПН. Вони призводять до сильних пожеж та виходу з ладу суміжного обладнання. Саме тому у країнах з розвинутою енергетичною системою намагаються відмовитися від використання РПН.

Суть методу ідентифікації внутрішніх пошкоджень обмоток трансформатора [4], зокрема виткових замикань, ґрунтується на аналізі зміні параметрів системи рівнянь, що описує електромагнітний зв'язок обмоток трансформатора у вигляді

$$\begin{cases} u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} ; \\ u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} ; \\ \vdots \\ u_n = R_n \cdot i_n + L_n \cdot \frac{di_n}{dt} + w_n \cdot \frac{d\Phi}{dt} ; \\ w_1 \cdot i_1 + w_2 \cdot i_2 + \dots + w_n \cdot i_n - U_M(\Phi) = 0 , \end{cases} \quad (1)$$

де u_1, u_2, u_n – напруги обмоток трансформатора; i_1, i_3, i_n – струми обмоток трансформатора;

R_2, R_n, L_1, L_2, L_n – активні та індуктивні опори обмоток трансформатора; w_1, w_2, w_n – кількості витків обмоток трансформатора; Φ – робочий магнітний потік; $(U_M(\Phi))$ – падіння магнітної напруги у магнітопроводі трансформатора. Оскільки, спільним параметром для всіх рівнянь обмоток є робочий потік Φ , з нього і починався аналіз стану обмоток трансформатора. Суть методу полягає у знаходженні його значення за одним із рівнянь та підстановці до інших з метою розрахунку значення активного опору обмотки у певні моменти часу. Зміна цього параметра під час виткового замикання дає змогу судити про наявність чи відсутність аварійного процесу в трансформаторі..

Отже розроблений метод ідентифікації ґрунтується на різниці розрахованого і реального активного опору обмоток трансформатора внаслідок розбалансу коефіцієнта трансформації в доаварійному і аварійному режимах. Під час аварійних процесів всередині трансформатора ці параметри змінюються [2]. Під час виткового замикання опір пошкодженої обмотки різко зменшується, оскільки частина обмотки шунтується, однак основною причиною його зміни є реальна зміна коефіцієнта трансформації (кількості робочих витків).

Оскільки результатом дії РПН є зміна кількості витків, то виникає питання про можливість застосування запропонованого принципу для трансформаторів з РПН.

Постановка завдання

Проведено дослідження, спрямовані на виявлення впливу роботи пристрою РПН на чутливість та селективність [1] запропонованого в [4] методу ідентифікації виткових замикань. Виявлено проблеми, що можуть спричинити хибну роботу захисту та запропоновано рішення, які спрямовані на відлаштування від хибного спрацювання під час перемикання в пристрої РПН для забезпечення необхідної селективності. Для досліджень використано математичну модель двообмоткового силового трансформатора 110/10,5 кВ з пристроєм РПН, що дає змогу регулювати коефіцієнт трансформації в межах $\pm 16\%$ із кроком 1,5 %.

Виклад основного матеріалу

Для створення математичної моделі трансформатора було використано програмний комплекс «REC» [5], у середовищі якого сформовано розрахункову схему, показана на рис. 1. Для моделювання трансформатора і роботи РПН [6–9] первинні обмотки трансформатора розбито на дві секції, перша з яких має параметри основної обмотки, для другої встановлені параметри 1,5 % від основної. Пристрій РПН моделюється комутаційними ключами і здвоєним струмообмежувальним реактором. Комбінації ключів дають змогу симулювати дію пристрою РПН, а саме – змінюючи порядок їх перемикання, можна додавати або віднімати задану кількість витків первинної обмотки, на якій здійснюється регулювання.

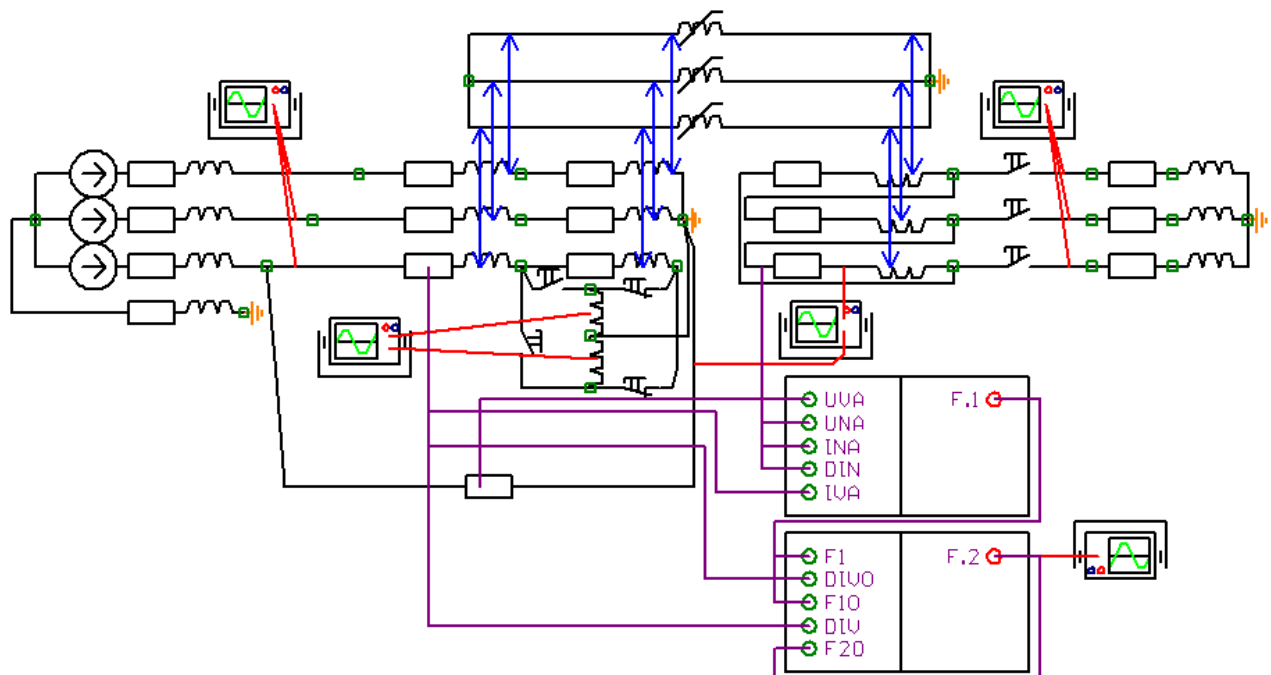


Рис. 1. Розрахункова схема симулювання впливу РПН на ідентифікацію виткових замикань у трансформаторі

Процес перемикання РПН можна умовно поділити на два етапи. Перший полягає у перемиканні одного з двох контакторів (кожен з контакторів моделюється двома комутаційними ключами) з однієї відпайки на іншу, що призводить до виткового замикання з тією лише різницею, що величина струму замикання обмежується спеціальним струмообмежувальним реактором до номінального значення струму в обмотці регулювання. Другий етап полягає у перемиканні другого контакту з відпайки, на якій він знаходився, на відпайку першого контакту і завершенні процесу перемикання, який приводить до зміни коефіцієнта трансформації. Відповідно до цього задачею

досліджень була оцінка впливу цих етапів перемикавання на процес ідентифікації, яку розглядали з двох позицій: а) перемикавання в бік збільшення кількості витків; б) перемикавання в бік їх зменшення.

Першою проблемою, що могла вплинути на результати ідентифікації, була наявність потенційних стрибків струму під час здійснення комутацій у РПН, оскільки всі перемикавання здійснюються під напругою. Однак дослідження показали, що струмообмежувальні реактори запобігають різкій зміні струму обмотки вище номінального значення.

Як було згадано вище, ідентифікація виткових замикань в обмотках трансформатора ґрунтується на аналізі співвідношення параметрів і координат системи рівнянь (1). Враховуючи те, що кількість витків обмоток і параметри магнітної системи не завжди відомі, запишемо (1) у вигляді:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{d\psi_p}{dt}; \\ u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + K_T \cdot \frac{d\psi_p}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

де ψ_p – робоче потокозчеплення, приведене до первинної обмотки; $K_T = w_1/w_2$ – коефіцієнт трансформації. Маючи реальні параметри вторинної обмотки, поточний коефіцієнт трансформатора і миттєві значення струму та напруги можна на основі другого рівняння визначити як $\frac{dy_p}{dt}$, а за значеннями миттєвих координат первинної обмотки у певні моменти – значення активного опору первинної обмотки (параметр ідентифікації). Цей алгоритм у моделі реалізують функціональні блоки F.1 і F.2:

F.1: $F1 = (Uva - (Una - 0.93669 \cdot Ina - 0.0081094 \cdot dln) \cdot 10.6383) / Iva$;

F.2: $F2 = \frac{F1 \cdot dlvo - F1o \cdot dlv}{dlvo - dlv} \cdot (dlv \leq 0) \cdot (dlvo > 0) + \frac{F1 \cdot dlvo - F1o \cdot dlv}{dlvo - dlv} \cdot (dlv \geq 0) \cdot (dlvo < 0) + F2o \cdot (dlv \leq 0) \cdot (dlvo < 0) + F2o \cdot (dlv \geq 0) \cdot (dlvo > 0)$,

де Uva, Una, Iva, Ina – миттєві значення напруг і струмів первинної і вторинної обмоток відповідно; dlv, dln – миттєві значення похідних струмів первинної і вторинної обмоток на поточному кроці інтегрування; $dlvo, F1o, F2o$ – значення похідної струму первинної обмотки і обчислених функцій на попередньому кроці інтегрування; 0.93669, 0.0081094, 10.6383 – константи, що відповідають величинам активного й індуктивного опору вторинної обмотки та коефіцієнта трансформації відповідно; $F2$ – значення параметра ідентифікації.

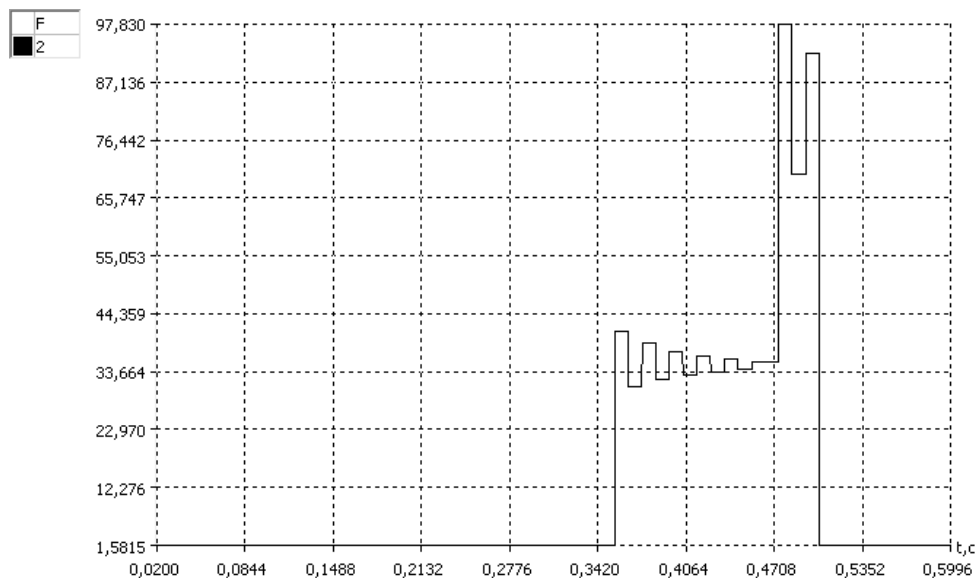
Важливою особливістю алгоритму розрахунку є збереження балансу значень магнітних зв'язків між обмотками та магнітопроводом і коефіцієнта трансформації в алгоритмі ідентифікації, що відповідає реальному неаварійному процесу. Тому чи не найголовнішою проблемою ідентифікації внутрішніх пошкоджень під час дії РПН є забезпечення у алгоритмі реального коефіцієнта трансформації, що відповідає певному положенню РПН.

Проведені дослідження підтвердили попередні висновки. Під час дії РПН у бік збільшення витків первинної обмотки параметр ідентифікації зростає, під час зменшення – різко зменшується і набуває від'ємних значень. Якщо у першому випадку збільшення параметра ідентифікації не відповідає процесу виткового замикання [2], то другий випадок приводить до хибної оцінки дії РПН як виткового замикання. Окрім цього, після завершення перемикавання параметр ідентифікації не відповідає новому дійсному значенню. Це навело на думку, що в алгоритмі ідентифікації необхідний зв'язок з пристроєм РПН – інформація про напрям дії РПН та його положення для корекції коефіцієнта трансформації. Такої інформації потребують і існуючі цифрові захисти трансформатора, що говорить про відсутність перешкод у вирішенні цієї проблеми.

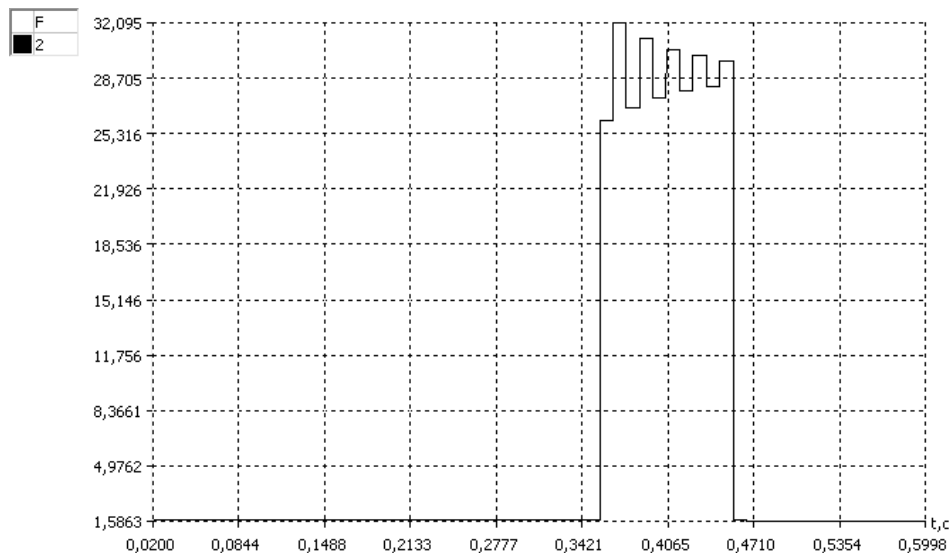
Реалізація вищесказаного у процесі симулювання дала змогу отримати бажаний результат – відлаштування алгоритму ідентифікації виткових замикань від хибного спрацювання під час дії РПН. Результати досліджень допомогли зробити такі висновки:

- під час перемикання РПН в бік збільшення кількості витків корегувати значення коефіцієнта трансформації в алгоритмі ідентифікації необхідно після перемикання;
- під час перемикання в бік зменшення кількості витків корегувати значення коефіцієнта трансформації в алгоритмі ідентифікації необхідно на початку перемикання.

За такого підходу параметр ідентифікації під час дії РПН змінюється в бік збільшення, тобто у протилежний бік, ніж за виткового замикання. Для прикладу на рис. 2 наведено залежності зміни параметра ідентифікації в режимі неробочого ходу (інтервал симулювання від 0 до 0,2 с) з подальшим увімкненням навантаження і дією РПН (інтервал від 0,3 до 0,5 с) для першого (рис. 2, а) і другого випадків (рис. 2, б).



а



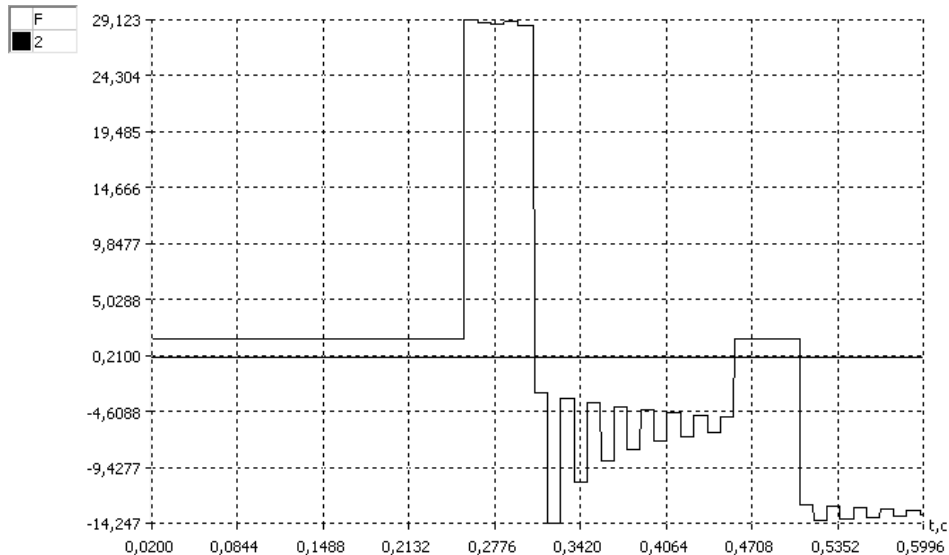
б

Рис. 2. Залежності зміни параметра ідентифікації виткових замикань у первинній обмотці трансформатора під час симулювання дії РПН:
а – перемикання в бік збільшення кількості витків;
б – перемикання в бік зменшення кількості витків

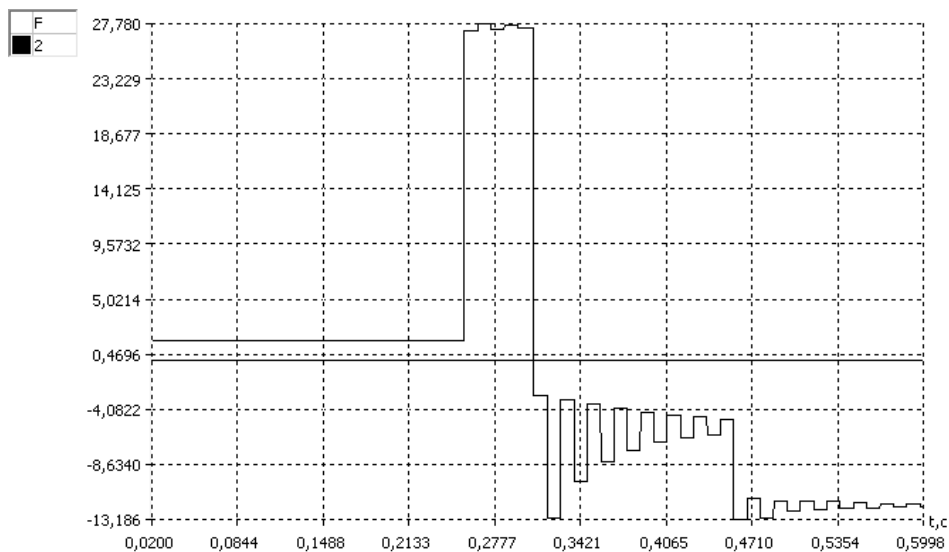
Як видно із наведених результатів симулювання, алгоритм визначення ідентифікатора виткових замикань правильно діє як за режиму неробочого ходу, так і під час увімкнення

навантаження і відновлює його реальне значення після дії РПН, що говорить про можливість його практичного застосування для захисту від виткових замикань у трансформаторах з РПН.

Після отриманого позитивного результату із відлаштування алгоритму ідентифікації від дії РПН постало природне питання – як працюватиме алгоритм під час дії РПН і виткового замикання обмотки регулювання одночасно? Результати таких досліджень для обох випадків наведені на рис. 3, де на інтервалі дії РПН від 0,25 до 0,5 с і виткового замикання від 0,3 до 0,6 с значення параметра ідентифікації переходить у зону від’ємних величин, що говорить про ідентифікацію виткового замикання у трансформаторі навіть під час дії РПН.



a



б

Рис 3. Залежності зміни параметра ідентифікації виткових замикань у первинній обмотці трансформатора під час симулювання дії РПН і виткового замикання:

a – перемикання в бік збільшення кількості витків;

б – перемикання в бік зменшення кількості витків

Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки щодо впливу дії пристрою РПН на алгоритм ідентифікації виткових замикань у силових багатообмоткових трансформаторах:

- отримані залежності зміни параметра ідентифікації під час перемикання пристрою РПН вказують на його суттєвий вплив на алгоритм розрахунку параметра ідентифікації виткових замикань, оскільки здійснюється додавання чи віднімання витків до обмотки трансформатора, що змінює коефіцієнт трансформації трансформатора;
- правильна робота алгоритму можлива тільки на основі використання інформації про напрям дії РПН та його поточне положення для корегування коефіцієнта трансформації;
- запропоновано рішення, які дають змогу відлаштувати алгоритм виявлення виткових замикань від хибної дії під час перемикань РПН і не лише відновлювати його функції після завершення перемикань, але і виявляти виткові замикання під час перемикань.

1. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем / В. П. Кідиба. – Львів : Видавництво Львівської політехніки. – 2015. – 504 с. 2. Равлик О. М. Ідентифікація виткових замикань в однофазному двохобмотковому трансформаторі / О. М. Равлик, Б. В. Дмитрик //– Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – 2015. – № 834. – С. 15–19. 3. Dmytryk B. V. The detection of Winding Short Circuits in Single-Phase Double-Winding Transformer / B. Dmytryk, O. Ravlyk – Proceedings for 5th International Youth Science Forum "Litteris Et Artibus" – Lviv. – 2015 – P. 148. 4. Спосіб ідентифікації виткових замикань в однофазних силових двохобмоткових трансформаторах / О. М. Равлик, Б. В. Дмитрик. – Патент на корисну модель № 107929 Бюл. № 12 від 24.06.2016 р. 5. Програмний комплекс «РЕС» для аналізу процесів в електричних мережах, системах їх захисту й автоматики / О.М. Равлик, Н. О. Равлик. – Свідоцтво про реєстр. авт. права на твір.– 2015. – № 62351. 6. Принц М. В. «Трансформатори. Монтаж, обслуговування та ремонт» / М.В. Принц, В.М. Цимбалістий. – Львів: Оріяна-Нова, 2007. 7. «ДонОРГРЕС», Трансформатори силові. Типова інструкція з експлуатації. СОУ 40.1-21677681-07:2009 – Міністерство палива та енергетики України Київ. – 2009. –59 с. 8. Стародубцев Ю. Н., Теория и расчет трансформаторов малой мощности / Ю. Н. Стародубцев. – Радтософт. –2015, 120 с. 9. Прянишников В. А. Теоретические основы электротехники / В. А. Прянишников. – СПб.: Корона принт. – 2009. – 125 с.