

В.П. Калінчик, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-4028-0185
В.А. Побігало, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-2673-7329
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ ОБМЕЖЕННЯМ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

На разі зростання рівнів та кількості струмів короткого замикання, існують проблеми, пов'язані з підвищенням ефективності методів та засобів обмеження струмів короткого замикання, які є актуальними у контексті розвитку енергетичного сектору України. Ключовим аспектом тут є інтенсифікація темпів зменшення витрат електроенергії у виробничих системах електропостачання (ВСЕП), що може бути досягнуто шляхом впровадження нових або з підвищеною ефективністю існуючих методів та засобів обмеження струмів короткого замикання. Присутня наукова та практична актуальність вдосконалення функціонування засобів обмеження струмів короткого замикання (КЗ), сформульована мета та завдання наукового дослідження. В якості рішення уперше запропоновано та досліджено спосіб управління обмеження струмів короткого замикання у ВСЕП з використанням струмообмежуючого реактора з керованим шунтом. Розроблено алгоритм дії системи «реактор - керований шунт». Вперше побудовано схему причинно-наслідкових зв'язків виникнення струмів КЗ у ВСЕП - використовуючи діаграму «аналізу кореневих причин» Ісікава, відповідно до ISO 9004. Запропонований спосіб обмеження струмів КЗ в ВСЕП і обладнання для його реалізації за схемою «реактор – керований шунт», яка повністю компенсує всі недоліки, що виникають при обмеженні струмів КЗ в ВСЕП за схемою обмеження «реактор - нерегульований шунт». Слід також зазначити, що обмеження струмів КЗ в ВСЕП за схемою «реактор - керований шунт» має певні суттєві переваги перед іншими існуючими на сьогоднішній день засобами обмеження струмів КЗ.

Ключові слова: струм короткого замикання, реактор, керований шунт.

Вступ. Серед проблем розвитку енергетичного комплексу України важливе місце в умовах зростання рівнів струмів короткого замикання (КЗ) займають питання підвищення ефективності методів і засобів їх обмеження. При цьому основним чинником є інтенсифікація темпів зменшення витрат електричної енергії у електропостачальних виробничих систем (ЕПВС), що може бути досягнуто реалізацією нових і підвищенням ефективності існуючих методів і засобів обмеження струмів КЗ. Якщо розглядати питання зменшення витрат електричної енергії шляхом модернізації і заміни обладнання, то такі рішення вимагають ретельного аналізу сучасних умов роботи електрообладнання, а так само і значних капітальних вкладень. Проблема ускладнюється тим, що в ЕПВС є значна кількість обладнання, яке потрібно замінити за умовами ймовірнісних струмів КЗ і обладнання з виробленим терміном служби або значним зносом, одночасно з цим промисловість не забезпечує потреби виробничих систем у відповідному електрообладнанні. Це призводить до того, що можливості існуючого струмообмежуючого обладнання не завжди використовуються ефективно, а капітальні вкладення можуть бути економічно невиправданими, також не враховуються можливості використання енергозберігаючих схемних рішень. Тому питання про такий спосіб вирішення даної проблеми необхідно вирішувати з урахуванням техніко-економічного аналізу.

Дослідження показують, що питання зниження витрат електричної енергії під час відсутності струмів КЗ у ЕПВС, потребують нових підходів при їх вирішенні [1-4]. Це пов'язано як з подальшим підвищенням ефективності функціонування засобів і методів обмеження струмів КЗ, що використовуються на сьогоднішній день, так і з активним використанням принципово нових засобів і методів обмеження струмів КЗ, а саме – пристроїв керування засобами обмеження струмів КЗ, з метою функціонального вдосконалення [1-4].

Проведений аналіз вже існуючих засобів і методів обмеження струмів КЗ свідчить, що до теперішнього часу використання пристроїв керування системами обмеження струмів КЗ не використовувалося. Необхідність та актуальність цих рішень доводить, що, підвищуючи ефективність засобів обмеження струмів КЗ, завдяки пристроям керування засобами обмеження струмів КЗ, можна знизити витрати, які пов'язані з обслуговуванням устаткування, що обмежує струми КЗ, за рахунок зменшення витрат у режимі відсутності аварійних процесів, а саме струмів КЗ, тобто здійснити реальне енергозбереження при обмежен-

ні струмів КЗ у ЕПВС [1-7]. На рис. 1. представлено приклад головної схеми електропостачання власних потреб ТЕЦ з реактованими лініями від генераторного розподільчого пристрою, де 1 - лінії робочого живлення; 2 - лінії резервного живлення; 1Р-8Р секції 6 кВ агрегатних власних потреб; 1СН, 2СН - секції 6 кВ загальностанційного навантаження; Т – трансформатор; LR – струмообмежуючий реактор; QF – вимикач високовольтний; I-VI електродвигуни блокового і загальностанційного навантаження. На даній схемі представлено приклад типових підключень одного із найбільш розповсюджених засобів обмеження струмів КЗ - струмообмежуючих реакторів LR, які використовуюються у ЕПВС для захисту від струмів КЗ у мережі 6-10 кВ. Лінійний реактор, що включається послідовно у відповідну лінію (приєднання), обмежує струм КЗ і підтримує відповідний рівень залишкової напруги в вузлах попередньо увімкненої мережі при КЗ. Лінійні струмообмежуючі реактори можуть бути індивідуальні - для однієї лінії і групові - для декількох ліній. Обмотки реакторів виконуються, як правило, з багатожильного ізолюваного проводу - мідного або алюмінієвого, на номінальні струми 630 А і більше. Однак, в ньому у безаварійному нормальному режимі роботи, тобто відсутність струмів КЗ, мають місце витрати активної і реактивної потужності, які призводять до витрат електричної енергії. Ця особливість роботи струмообмежуючих реакторів і є суттєвим недоліком, але враховуючи їх ефективність обмеження струмів КЗ у ЕПВС, слід відзначити, що застосування такого засобу має бути вдосконалено за допомогою впровадження пристроїв керування засобами обмеження струмів КЗ.

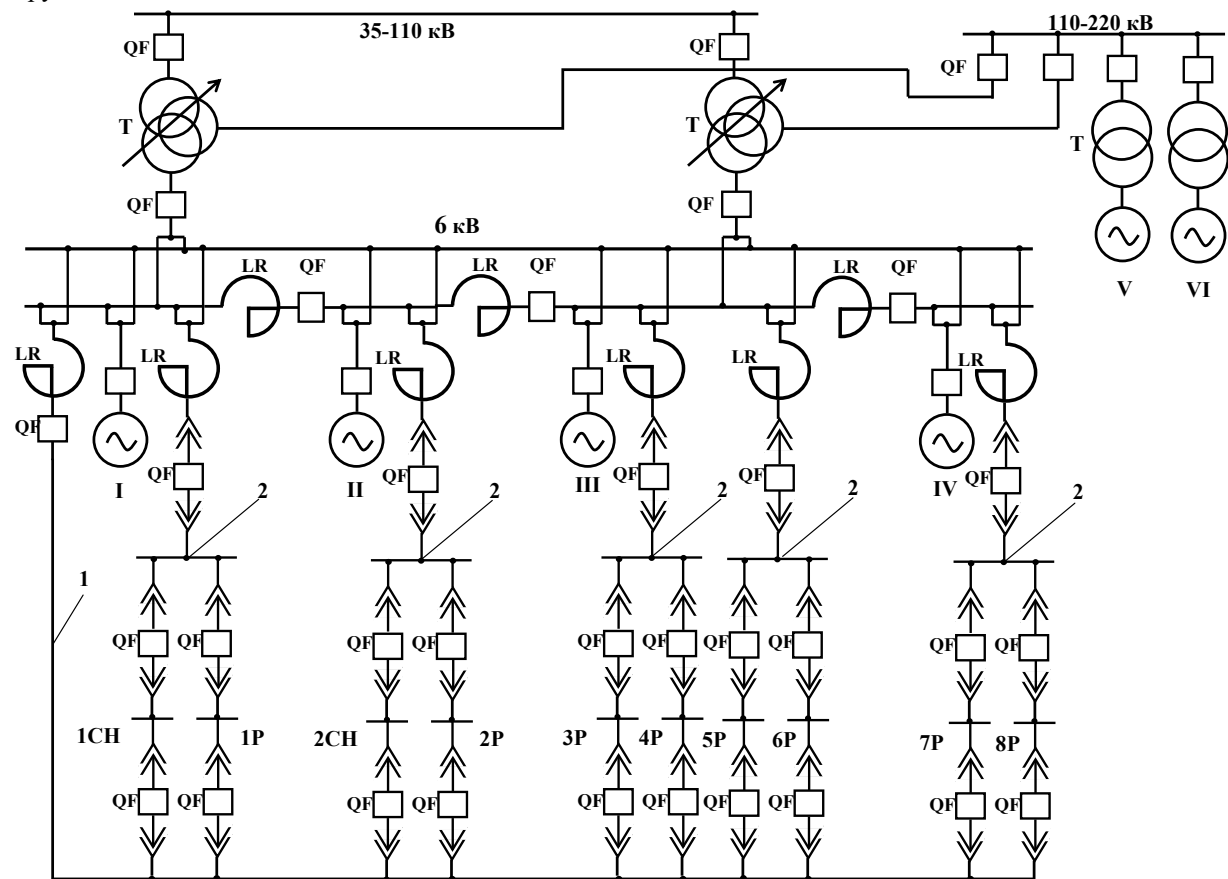


Рис. 1. Приклад головної схеми електропостачання власних потреб ТЕЦ

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування засобів обмеження струмів КЗ у виробничих системах за рахунок оптимізації режимів їх функціонування.

Для досягнення поставленої мети у статті необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз способів і засобів обмеження струмів КЗ у ЕПВС;
- розробити комплекс «реактор – керований шунт», що є методом керування засобами обмеження струмів КЗ;
- побудувати алгоритм роботи комплексу «реактор – керований шунт», як методу керування засобами обмеження струмів КЗ.

Спосіб керування обмеженням струмів КЗ за схемою «реактор – керований шунт». При експлуатації ЕПВС промислових в режимі роботи електроустановок і можуть вести до порушення електропостачання споживачів електроенергії. З огляду на основні причинно-наслідкові зв'язки виникнення

струмів КЗ можна побудувати схему причинно-наслідкових зв'язків виникнення струмів КЗ (схема Ісікави) [8, 9] згідно ISO 9004, що представлений на рис. 2.

Наслідками КЗ в електроустановках є: ушкодження електроустаткування, знос ресурсу вимикачів, зниження рівня напруги в мережі, загоряння й інші прояви збитку. По своїй фізичній сутності струм КЗ є безперервно випадковим процесом. Сукупність характеристик, що описують ймовірний характер різних параметрів і умов КЗ, є ймовірними характеристиками КЗ в електроустановці.

З метою зменшення впливу струмів КЗ на електроустаткування запропоновані і використовуються різні методи і засоби обмеження струмів КЗ. З огляду на специфіку розвитку ЕПВС, а також техніко-економічні характеристики розробляються і досліджуються принципово нові засоби обмеження струму КЗ, які дозволяють обмежувати не тільки величину струму КЗ, але і його тривалість.

Як відомо [1, 2, 5, 6], в Україні найбільш розповсюдженим засобом обмеження струмів КЗ у мережах 6-10 кВ є нерегульовані одинарні та здвоєні бетонні реактори з лінійною характеристикою. Вони розрізняються конструктивним виконанням, а також технічними і техніко-економічними характеристиками і параметрами. Існує загальна класифікація реакторів з різним призначенням, що наведена в ГОСТ 18624-73 «Реакторы электрические. Термины и определения».

Поряд з існуючими способами і засобами обмеження струмів КЗ можуть бути застосовані технічні засоби керування обмеженням струмів КЗ. Зокрема, розглянемо спосіб керування засобами обмеження струмів КЗ, який може базуватися на теорії розпізнавання образів, застосування якої дозволяє розпізнавати нормальні, передаварійні та аварійні режими експлуатації ЕПС виробничих систем.

Для рішення задачі підвищення ефективності функціонування засобів обмеження струмів КЗ пропонується комплекс і спосіб керування обмеженням струмів КЗ у ЕПВС за схемою «реактор – керований шунт», у якому включення і відключення індуктивного опору здійснюється автоматично при виникненні струму КЗ [10-12].

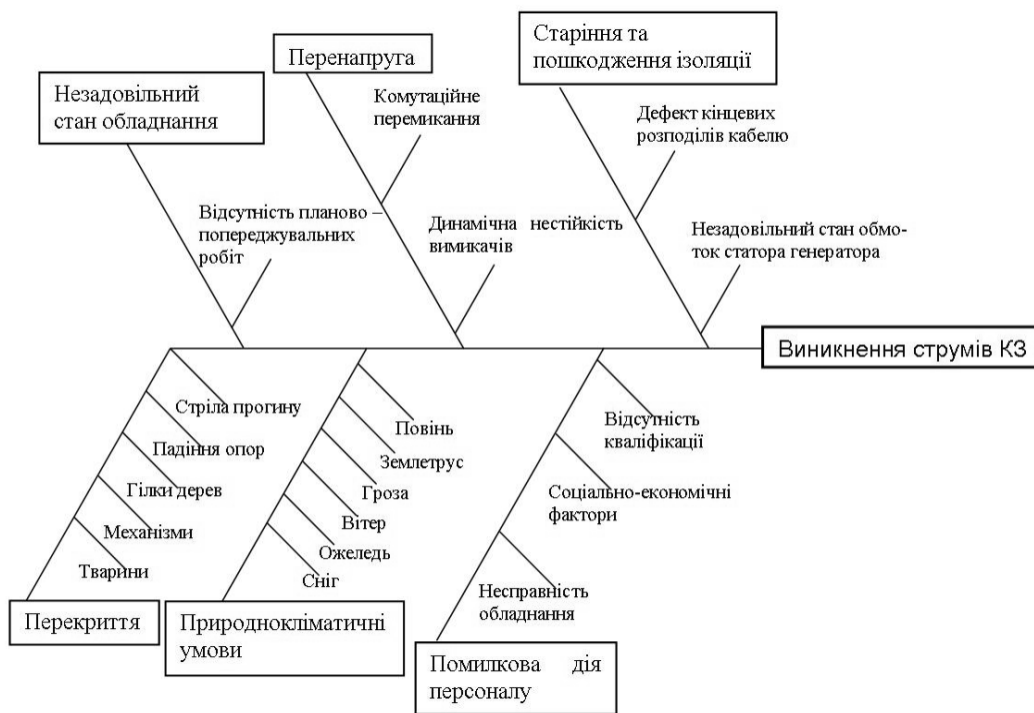


Рис. 2. Схема причинно-наслідкових зв'язків виникнення струмів КЗ

Структурна схема і принцип дії пристрою. Принцип дії пристрою, який застосовується в якості засобу керування обмеженням струмів КЗ, а саме, заснований на порівнянні вимірюваного струму з еталонним і формуванні керуючого сигналу, що впливає на індуктивний опір.

На рис. 3 представлена структурна схема запропонованого пристрою обмеження струму КЗ. У розрізі електричної мережі 1 включений індуктивний опір (реактор, що обмежує струм КЗ) LR , який зашунтовано комутаційним елементом 5 (наприклад, індуктивно-динамічним пристроєм). До електричної мережі 1 підключений блок виміру 2, зв'язаний з аналізатором 3, керуючий вихід якого через пристрій 4 підключений до входу керування комутаційного елемента 5.

Періодично через відрізки часу Δt ($\Delta t = T/N$, де T – інтервал контролю, N – число точок контролю) вимірюють величину фактичного струму електричної мережі I_{fj} . Далі визначають величину неузгодженості ΔI_t між фактичним I_{fj} і заданим (еталонним) I_{te} струмом

за контрольований інтервал часу T

$$\Delta I_t = \sqrt{\sum_{t=1}^n (I_{tf} - I_{te})^2}, \quad (1)$$

де I_{te} – величина, що враховує умови навантаження, які виникає в момент пуску електродвигунів з номінальним струмом I_n (визначається з виразу $I_{te} = 1,8 I_n$); I_{tf} – величина фактичного струму електричної мережі.

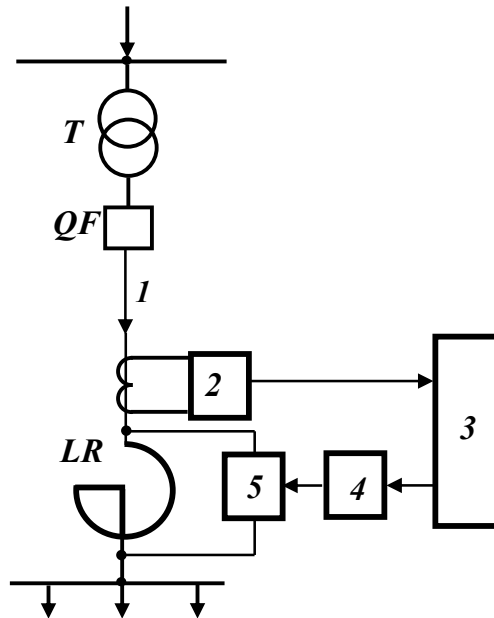


Рис. 3. Структурна схема запропонованого пристрою обмеження струму КЗ

У випадку, якщо $\Delta I_t \geq \delta I$, де величина δI (наприклад $\delta I = 0,1$), установлюється кроком дискретизації, формується керуючий вплив, що відключає комутуючий елемент.

У всіх інших випадках пристрій 3 формує сигнал керування для комутаційного елемента 5, що шунтує індуктивний опір LR . Після цього інформація з блоку виміру 2 знову надходить на аналізатор 3 [10-12].

У комплексі «реактор – керований шунт» використовується математичний метод нелінійного перетворення, який полягає в тім, що в процесі керування обмеженням струмів КЗ наданий для розпізнавання сигнал і еталон піддають нелінійному перетворенню і, як міру подібності, використовують функціонал

$$S = \int_0^T \{\varphi[x(t)] - \varphi[z(t)]\}^2 dt,$$

де φ – оператор перетворення.

Таким чином, вибирається відстань між сигналом та еталоном після їх нелінійного перетворення, мета якого є мінімізація цієї відстані, тобто ущільнення сигналів усередині одного класу при одночасному збільшенні відстані між сигналами та еталонами різних класів. Цей принцип базується на принципі стислих зображень, який формулюється теоремою Банаха [13-16].

Проектуючи систему «реактор – керований шунт» було доведено залежність статистичних ознак – функцій, які використовуються при побудові системи керування засобами обмеження струмів КЗ «реактор – керований шунт», від характеристик ймовірного процесу. Для цього було використано математичний апарат викиду ймовірних функцій. Було визначено, що математичне очікування статистичної ознак – функції випадкового процесу дорівнює густині розподілу ймовірності цього процесу, що усереднена за час аналізу

$$M[h(x)] = \frac{1}{T} \int_0^T f(x, t) dt.$$

Було також виведено залежності, які визначають перший і другий статистичні моменти ознак – функції по відомим одномірним і двомірним щільностям розподілу ймовірності вихідного випадкового процесу.

Алгоритм обмеження струму КЗ системою «реактор – керований шунт», наведено на рис. 4.

Запропонований спосіб обмеження струмів КЗ у ЕПВС та комплекс для його реалізації за схемою

«реактор – керований шунт» повністю компенсує недоліки, які мають місце при обмеженні струмів КЗ у ЕПВС за схемою «реактор – некерований шунт» [14]. Слід також обмеження струмів КЗ у ЕПВС за схемою «реактор – керований шунт» має певні переваги по відношенню до інших засобів обмеження струмів КЗ, зокрема:

- швидкодія та надійність;
- дотримання вимог з енергозбереження;
- можливість збору та якісного використання статистичних даних по струмам КЗ у ЕПВС;
- наявність подальшого розвитку та вдосконалення цієї системи обмеження струмів КЗ.

Економічне обґрунтування. Економічний ефект від впровадження запропонованого автоматичного пристрою управління обмеженням струмів КЗ визначається відповідно до методики [14].

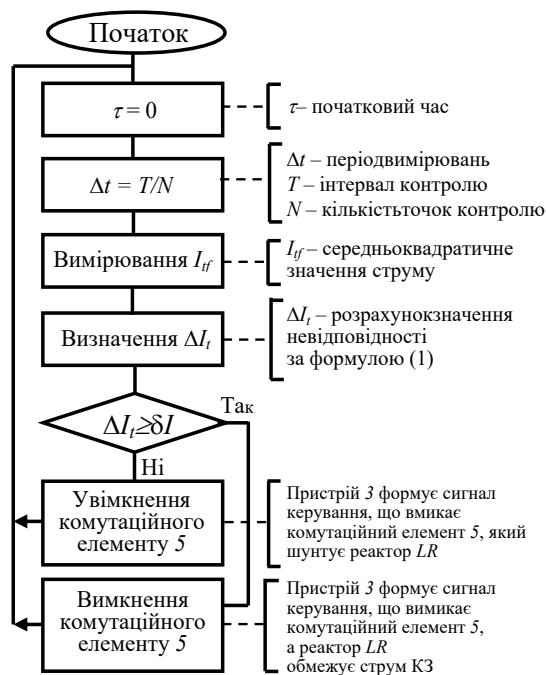


Рис. 4. Алгоритм роботи аналізатора

Після встановлення пристрою в мережі 6-35 кВ зниження сумарних витрат активної потужності в трифазних групах реакторів наступне:

$$\Delta P_{E\Sigma} = \left(1 - \frac{1}{K_2}\right) \sum_{i=1}^n 3 \Delta P_{ni} \left(\frac{I_{mi}^2}{I_{ni}^2}\right), \text{ кВт}$$

$$\text{де } K_2 = \frac{R_p (1 + K_1)^2}{(x_p K_1)}; \quad K_1 = \frac{R_{device}}{x_r}; \quad I_m = I_{device} + I_r;$$

де I_m - максимальний струм; P_n - номінальні витрати в реакторі; X_r - реактивний опір реактора; R_p - активний опір реактора; R_{device} - опір пристрою управління обмеженням струмів КЗ; I_r - струм, що протікає через реактор; I_{device} - струм, що протікає через пристрій управління обмеженням струмів КЗ; I_n - номінальний струм.

Реактивні витрати при $R_{device} \leq X_r$ усуваються практично повністю і сумарний технічний ефект складає

$$\Delta Q_{E\Sigma} = \sum_{i=1}^n 3 I_{mi}^2 X_{ri} 10^{-3}, \text{ квар.}$$

Річна економія активної (τ_a) та реактивної (τ_r) електроенергії визначається за часом витрат:

$$\tau_a = \left(0,124 \cdot \frac{T_{ma}}{10^4}\right)^2 \cdot 8760, \text{ год/рік;}$$

$$\tau_r = \left(0,124 \cdot \frac{T_{mr}}{10^4}\right)^2 \cdot 8760, \text{ год/рік;}$$

де T_{ma} , T_{mr} - максимальне число використання відповідно до активного і реактивного навантаження.

При цьому річна економія енергії в результаті встановлення пристрою управління обмеженням струмів КЗ складе (відповідно $\Delta W_{\Sigma P}$ – в кВт·год і $\Delta W_{\Sigma Q}$ – в квар·год):

$$\Delta W_{\Sigma P} = \Delta P_{E\Sigma} \tau_a$$

$$\Delta W_{\Sigma Q} = \Delta Q_{E\Sigma} \tau_r$$

Відповідно до діючих договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем в Україні, оплачується тільки фактична витрата електроенергії по ставках, встановлених для 1 і 2 класу промислових споживачів з приєднаною потужністю S . Виходячи із структури споживання електричної енергії пряма економія у вартісному вираженні для пристрою управління обмеженням струмів КЗ, що встановлюються в реактованих лініях, запишеться так

$$S = (\alpha \cdot \Delta W_{\Sigma P} + \gamma \cdot \Delta W_{\Sigma Q}) \cdot 10^{-2} =$$

$$= (\alpha \cdot \Delta P_{E\Sigma} \cdot \tau_a + \gamma \cdot \Delta Q_{E\Sigma} \cdot \tau_r) \cdot 10^{-2},$$

де α, γ – коефіцієнти активної і реактивної енергії відповідно.

В якості прикладу наведемо результати порівняльного розрахунку ефективності використання найбільш розповсюджених типів струмообмежуючих реакторів у виробничих системах 6-10 кВ за системою «реактор – керований шунт» (табл. 1), де прийняті такі позначення: I_n – номінальний струм струмообмежуючого реактора; x_r – номінальний індуктивний опір струмообмежуючого реактора; L_n – номінальна індуктивність; S – потужність струмообмежуючого реактора; ΔW_r – споживання електроенергії за місяць без використання системи «реактор – керований шунт»; ΔW_r^{CS} – споживання електроенергії за місяць з використанням системи «реактор – керований шунт».

Таблиця 1

Тип реактора	I_n , А	x_r , Ом	L_n , мГ	S , кВ·А	ΔW_r , кВт·год	ΔW_r^{CS} , кВт·год
РБА-6-400-3	400	3	0,827	4160	14506,2	1,22
РБА-6-600-4	600	4	0,735	6240	18048,4	1,78

Висновки.

У діючих умовах договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем електричної енергії в Україні у промислових мережах 6-10 кВ потрібно оперативне керування обмеження струмами КЗ, що стосуються зміни поточного режиму при проведенні планових заходів та при аварійних відключеннях тощо. Це неможливо без оперативного прогнозування режимів в умовах нормальної експлуатації і аварійних ситуаціях, яке має бути здійснено лише при відповідному програмному та апаратному оснащенні.

У роботі вперше запропоновано пристрій керування обмеженням струмів короткого замикання, де включення і відключення індуктивного опору (струмообмежуючого реактора) виконується автоматично (індуктивно-динамічним швидкодіючим пристроєм) в залежності від наявності або відсутності струму КЗ. Даний спосіб керування засобами обмеження струмів короткого замикання є перспективним та потребує подальшого розвитку та вдосконалення.

Отримані теоретичні і практично-дослідні результати, які надають підстави для подальшого розвитку нових методів і засобів обмеження струмів короткого замикання в виробничих системах електропостачання з урахуванням усіх особливостей договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем в Україні.

Список використаної літератури

1. Півняк Г.Г. Перехідні процеси в системах електропостачання. – Дніпро, 2016. 600 с.
2. Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И., Слесарев В.В. Эффективные режимы работы электротехнологических комплексов. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 184 с.
3. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for institutions of higher education from Ukrainian by S.I. Kostritska and I.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. – 2 nd edition. – D.: National Mining University. – 2013. – 239 p.
4. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. – 382 p.
5. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. - М.: BHV 2013г. 237 с.

6. Неклепаев Б.Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М.: Энас 2018г. 144с.

7. Kaoru Ishikawa. How to operate QC Circle Activities, Amer Society for Quality, 1985. ISBN 978-9999943109.

8. Kaoru Ishikawa. Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986. ISBN 978-9283310358.

9. Розен В.П., Побігайло В.А. Засіб струмообмеження як один з способів ефективного енерговикористання // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2001. – № 421. – С. 181 – 188.

10. Розен В.П., Тарадай В.И., Несен Л.И., Побігайло В.А. Аналіз підходів до вирішення проблеми обмеження струмів короткого замикання у виробничих і енергетичних системах / ІЕЕ НТУУ «КПІ». – Київ.: 1999. – 18 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ України 26.07.99, № 225 Ук99 // Анот. в ж. ВІНИТИ РАН № 10 (333), 1999.

11. Розен В.П., Соловей О.И., Момот Д.С., Побігайло В.А. Математична модель роботи струмообмежувальних пристроїв за схемою «реактор – запобіжник» // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія гірництво. – 2000 р. – № 4. – С. 82 – 90.

12. El-Kady M.A. Probabilistic short-circuit analysis by Monte Carlo simulations // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1998. № 5. P. 1308-1316.

13. Патент України № 2002021620 від 15.11.2002 р. Спосіб обмеження струмів КЗ і пристрій для його реалізації. В.П. Розен, В.П. Калинчик, Д.Е. Момот, В.А. Побігайло.

14. Скловська Е.Г., Сердюк Б.Н. Економіка енергетики. Підручник. Затверджено ВР НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського. – Київ.: Видавництво «Каравела», 2015. - 378 с.

V. Kalinchyk, PhD, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-4028-0185

V. Pobigaylo, PhD, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2673-7329

**National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

SHORT CIRCUIT CURRENT CONTROL DEVICE TO INCREASE THE EFFICIENCY OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Amid growing levels of short-circuit currents, issues related to increasing the efficiency of methods and means of limiting short-circuit currents are central in the context of development of Ukraine's energy sector. A key factor here is intensifying pace of decreasing electricity losses in power supply production systems (PSPS), which could be achieved through implementation of new and improved efficiency of existing methods and means of limiting short circuit currents. The scientific and practical relevance of improving the functioning of credit limit short – circuit (short circuit), formulated the goal and objectives of research. As a solution proposed research and the way to manage complex limitation of short circuit currents in electricity supply production systems under the reactor – controlled shunt. The algorithm of the system reactor – controlled shunt. For the first time the schemes cause – effect relationships occurrence of short – circuit currents – Figure Ysikavy according to ISO 9004. The proposed method of limiting short circuit currents in the PSPS and the suite for its implementation under the controlled shunt reactor scheme fully compensates for all the disadvantages that occur when limiting short circuit currents in the PSPS under the unregulated shunt reactor scheme. It should also be noted that the limitation of short circuit currents in the PSPS under the controlled shunt reactor scheme has certain advantages over other means of limiting short circuit currents.

Keywords: short-circuit current, reactor, Ishikawa, ISO 9004 performance, limitations, fuse, controlled shunt, reduced losses.

REFERENCES

1. Pivnyak, H.H. Perekhidni protsesy v systemakh elektropostachannya [Transients in Electric Power Supply Systems]– Dnipro [in Ukrainian].

2. Shylovskiy, A.K., Pivnyak, H.H, Vypanasenko, S.I., Slesarev, V.V. Effektivnye rezhimy raboty elektrotekhnologicheskikh kompleksov [Effective modes of operation of electrotechnological complexes]. – Dnepropetrovsk: NGA Ukrainy [in Russian]

3. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for higher education institutions from Ukrainian by S.I. Kostritska and I.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. - 2nd edition. - D.: National Mining University. - 2013. - 239 p.

4. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for higher education institutions: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University - 5th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. - Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016.- 382 p.
5. Neklepayev, B.N. Elektricheskaya chast' elektrostantsiy i podstantsiy [The electrical part of power plants and substations]. M.: BHV 2013. -237 p. [in Russian]
6. Neklepayev, B.N. Rukovodyashchiye ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya [Guidelines for the calculation of short circuit currents and the selection of electrical equipment]. – M.: Enas 2018. -144 p. [in Russian]
7. Kaoru Ishikawa. How to operate QC Circle Activities, Amer Society for Quality, 1985. ISBN 978-9999943109.
8. Kaoru Ishikawa. Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986. ISBN 978-9283310358.
9. Rozen V.P., Pobihaylo, V.A. Current limiter as one of the ways of efficient energy use // Bulletin of the National university "Lviv Polytechnic". Electric power and electromechanical systems[in Ukrainian]
10. Rozen, V.P., Taraday, V.I., Nesen, L.I., Pobihaylo V.A. Analysis of approaches to solving the problem of limiting short-circuit currents in production and power systems / Abstract in the bulletin of VINITI RAN - All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences[in Ukrainian]
11. Rozen, V.P., Solovey, O.I., Momot, D.E., Pobihaylo, V.A. Mathematical model of current limiting devices according to the scheme "reactor - fuse" // Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Mining series[in Ukrainian]
12. El-Kady, M.A. Probabilistic short-circuit analysis by Monte Carlo simulations // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1998. No. 5. p. 1308-1316.
13. Patent Ukrayiny № 2002021620 vid 15.11.2002 r. Sposib obmezheniya strumiv KZ i prystryi dlya yoho realizatsiyi [Patent of Ukraine No. 2002021620 of 15.11.2002 Method for limiting short circuit currents and the device for the method implementation] V.P. Rozen, V.P. Kalynchyk, D.E. Momot, V.A. Pobihaylo [in Ukrainian]
14. Sklovska E.H., Serdiuk B.N. Ekonomika enerhetyky [Energy Economics]. Textbook. – Kyiv.: Vydavnytstvo «Karavela»[in Ukrainian].

Надійшла 28.07.2020
Received 28.07.2020