

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-29-33>

УДК 621.316

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ ІЗ ОГЛЯДУ НА НАЯВНІСТЬ В ЇХНЬОМУ СКЛАДІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Філімоненко Н. М., Філімоненко К. В.

POWER SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS REGARDING OF POWER TRANSFORMERS BEING PART OF IT

Filimonenko N. M., Filimonenko K. V.

Стаття присвячена результатам дослідження щодо роботи силових трансформаторів, які входять до складу ОЕС України. Визначено причини та характер ушкоджень елементів системи, розглянуто питання надійності електропостачання енергосистеми в цілому і, зокрема, від якості роботи трансформаторів. Пошкодження трансформаторів безпосередньо впливає на надійність енергосистеми в цілому, тому необхідно приділяти особливу увагу моніторингу їхнього стану та своєчасного підтримання працездатності. Підвищення надійності роботи трансформаторів є ефективним заходом запобігання аварійних наслідків в системі ОЕС України.

Ключеві слова: система ОЕС України, енергосистема, силовий трансформатор, частота відмов окремого підстанційного обладнання.

Вступ. У процесі експлуатації електричної системи можливі різні види порушень нормального режиму – спади напруги, перевантаження, короткі замикання (КЗ), що можуть призвести до пошкодження і, навіть, руйнування електричної апаратури та струмопроводів. Безпосередніми чинниками виникнення аварій можуть бути пошкодження ізоляції або помилкові дії персоналу в разі оперативних перемикачів (наприклад, вимикання роз'єднувачем значних струмів навантаження, вмикання лінії під напругу, залишене після ремонту заземлення тощо).

Для зменшення збитків, які спричинені КЗ, елемент, що є пошкодженим, слід вимкнути якомога швидше – задля цього захист електроустановок від аварій або порушень нормального режиму здійснює спеціальний автоматичний пристрій – релейний захист. Релейний захист (РЗ) – частина електричної автоматики, що призначена для виявлення й автоматичного вимкнення електроустановки, яке є пошкодженням.

Постановка проблеми. Важливою особливістю систем електропостачання є неможливість створен-

ня запасів основного використовуваного продукту – електроенергії. Вся отримувана електроенергія негайно споживається. При виникненні непередбачуваної аварійної ситуації виникає дефіцит постачання електроенергії і, як наслідок, зупинка виробництв, відключення лікарень й інших важливих об'єктів інфраструктури.

Системі електропостачання є притаманною наявність глибоких внутрішніх зв'язків, які не дозволяють розщеплювати системний, комплексний підхід, що враховує взаємний вплив факторів і урахування їхньої динамічності. Під впливом різноманітних збурень відбувається безперервна зміна стану системи.

Забезпечення надійності електропостачання електроенергетичних систем (ЕЕС), мереж промислових підприємств, інфраструктури міст і селищ займає центральне місце як при експлуатації, так і при плануванні проектних рішень.

Слід зауважити важливість передбачуваності і безаварійності роботи такої важливої складової електроенергетичної системи як силові трансформатори. Безпосередніми чинниками виникнення аварій можуть бути різного виду пошкодження або помилкові дії персоналу, наприклад, в разі оперативних перемикачів. Однією з можливостей вирішення проблеми є аналіз можливих відмов в роботі, а також частота цих відмов, для забезпечення безперебійної та безпечної роботи ОЕС України.

Метою роботи є аналіз причин та статистики пошкоджуваності силових трансформаторів, що входять в систему ОЕС України, що дозволить виявити динаміку аварійності системи і її чинники. Забезпечення ефективного прийняття рішень щодо стратегії ефективної та безаварійної експлуатації енергосистеми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зазвичай в електричній частині енергосистеми

терміни «пошкодження» і «коротке замикання» є синонімами, хоча, це не завжди так. КЗ завжди є пошкодженням, а пошкодження не завжди є коротким замиканням. Наприклад, обрив фази – це пошкодження, але не КЗ. Як виключення, до пристроїв РЗ відносяться деякі пристрої, що призначені не для виявлення та вимикання пошкодженого електроустаткування, а для виявлення ненормальних режимів роботи електроустаткування (наприклад, захист від перевантаження трансформатора). Крім того, у деяких випадках, які не вимагають швидкого автоматичного відключення пошкодженого устаткування, пристрої РЗ можуть діяти не на вимикання, а на сигнал (наприклад, захист від замикань на землю в мережах із ізольованою нейтраллю).

Пристрої релейного захисту та противарійної автоматики можуть бути віднесені до пристроїв зі статичною готовністю до дії (на відміну від пристроїв безперервної дії).

Релейний захист і противарійна автоматика виконують свої функції на вимогу, якою є коротке замикання або інші порушення нормального режиму роботи об'єкта. Тому необхідно розрізнити відмову пристроїв захисту та автоматики як подію втрати працездатності та відмови функціонування, як подію невиконання заданої функції при виникненні відповідної вимоги. В загальному випадку відмова пристрою відбувається не одночасно із виникненням вимоги до функціонування та, отже, відмова функціонування може бути відвернена, якщо в інтервалі між моментом виникнення відмови й моментом виникнення вимоги буде проведена профілактична перевірка. Тому потік відмов функціонування залежить не тільки від потоку відмов пристрою, але й від організації технічного обслуговування, а, отже, і від якості проведення моніторингу. Таким чином, оскільки відмова пристрою може перетворитися у відмову функціонування лише при виникненні вимоги до функціонування, потік відмов функціонування залежить від потоку вимог до функціонування [1].

Підвищення надійності системи РЗА є ефективним заходом запобігання аварійних наслідків, які викликані відмовами в її функціонуванні. Більшість фірм виробників устаткування РЗА припиняють випуск електромеханічних реле і пристроїв і переходять на цифрову елементну базу. Перехід на нову елементну базу не приводить до зміни принципів релейного захисту і електроавтоматики, а тільки розширює їх функціональні можливості, спрощує експлуатацію та знижує її вартість [2].

Швидке зростання частки обладнання, що відпрацювало нормативний термін служби, зумовлює необхідність продовження його працездатності, підвищення економічності та підтримки надійності роботи енергосистеми в цілому. У багатьох промислово розвинених країнах, зокрема і в Україні, частка такого обладнання на сьогодні перевищує половину його складу.

Отже, 17,3% обладнання підстанцій і 56% ліній електропередач експлуатуються понад 40 років. Такий стан значно впливає на збільшення втрат електричної енергії в системі передачі та обмежує можливість запобігання технологічним порушенням – пошкодженням електротехнічного обладнання або порушенням його працездатності, що призводить до порушення нормальної та надійної роботи електроустановок об'єктів електроенергетики і об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України в цілому. Витрати електроенергії в основній мережі 220 - 750 кВ ОЕС України у 2017 р. дорівнюють 2,45% від надходження електроенергії в мережу без внутрішнього обігу, що значно перевищує аналогічні показники в системах передачі європейських країн. Терміни експлуатації основного обладнання показано в табл. 1 [3].

За відомостями [4,5] в енергосистемах України знаходяться в експлуатації 131 трансформаторних підстанцій класу напруги 220кВ і вище. Кожній із підстанцій притаманні свої умови роботи, що обумовлені кліматичними умовами, ступенем забрудненості навколишнього середовища, засобами й якістю контролю обладнання, своєчасністю виконання профілактичних робіт тощо.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що вкрай необхідно підвищувати надійність роботи силових трансформаторів як важливої складової електроенергетичної системи та забезпечувати безперебійну й безаварійну роботу ОЕС.

Результати дослідження.

Швидке зростання частки обладнання, що відпрацювало нормативний термін служби, зумовлює необхідність продовження його працездатності, підвищення економічності та підтримки надійності роботи енергосистеми в цілому. У багатьох промислово розвинених країнах, зокрема і в Україні, частка такого обладнання на сьогодні перевищує половину його складу.

Отже, 17,3% обладнання підстанцій і 56% ліній електропередач експлуатуються понад 40 років. Такий стан значно впливає на збільшення втрат електричної енергії в системі передачі та обмежує можливість запобігання технологічним порушенням – пошкодженням електротехнічного обладнання або порушенням його працездатності, що призводить до порушення нормальної та надійної роботи електроустановок об'єктів електроенергетики і об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України в цілому. Витрати електроенергії в основній мережі 220 - 750 кВ ОЕС України у 2017 р. дорівнюють 2,45% від надходження електроенергії в мережу без внутрішнього обігу, що значно перевищує аналогічні показники в системах передачі європейських країн. Терміни експлуатації основного обладнання показано в табл. 1 [3].

За відомостями [4,5] в енергосистемах України знаходяться в експлуатації 131 трансформаторних підстанцій класу напруги 220кВ і вище. Кожній із підстанцій притаманні свої умови роботи, що обумовлені кліматичними умовами, ступенем забрудненості навколишнього середовища, засобами й якістю контролю обладнання, своєчасністю виконання профілактичних робіт тощо.

мовлені кліматичними умовами, ступенем забрудненості навколишнього середовища, засобами й якістю контролю обладнання, своєчасністю виконання профілактичних робіт тощо.

Із урахуванням великої кількості обладнання й апаратів високої напруги різного призначення, що становить систему мережі підстанції, при оцінці надійності роботи підстанції в якості показника приймається питома частота відмов однієї підстанції:

$$F = \frac{n}{N \cdot t} \tag{1}$$

де n – число відмов оцінюваної підстанції;
 N – число обстежуваних підстанцій;
 t – період контролю, років.

Аналогічним чином визначається питома частота відмов окремого підстанційного обладнання, тільки при цьому у виразі (1) приймається: $n = n_{об}$, де $n_{об}$ – число відмов обладнання, яке нас цікавить, на конкретній підстанції.

Дані про кількість одиниць обладнання, що використовується, та термін його роботи зведені в таблицю.

Таблиця

Зведені дані по обладнанню, що використовується

Назва обладнання	Сумарна потужність, МВА	Кількість одиниць	Зокрема в експлуатації (років), одиниць			
			до 25	25 -30	30 -40	40 і більше
1. Автотрансформатори (220–750кВ) загалом, у тому числі:	74178	342	55	8	139	65
220 кВ	11508	67	3	12	28	24
330 кВ	44030	214	38	56	94	26
400 кВ	399	3	0	0	0	3
500 кВ	1753	10	3	3	4	0
750 кВ	16488	48	11	12	13	12
2. Трансформаторисилові (35–220кВ загалом, у тому числі:	4569,5	102	22	13	25	42
35 кВ	276,5	24	1	2	7	14
110 кВ	1604,5	39	14	6	6	13
154 кВ	710	13	4	3	2	4
220 кВ	1978,5	26	3	2	10	11

Зведені дані за питоною частотою відмов за певний період показують, що величина F на різних підстанціях коливається в діапазоні від нуля до одиниці відмов у рік. При цьому було виявлено, що частота відмов на підстанціях з великим класом напруги помітно вище, ніж на підстанціях нижчої напруги. Як приклад, на рисунку наведено розподіл

питомої частоти відмов по кожному обладнанню підстанцій 330кВ. Ці дані є результатом аналізу 58 розглянутих підстанцій цього класу напруги, тому репрезентуються за найбільш об'єктивні.

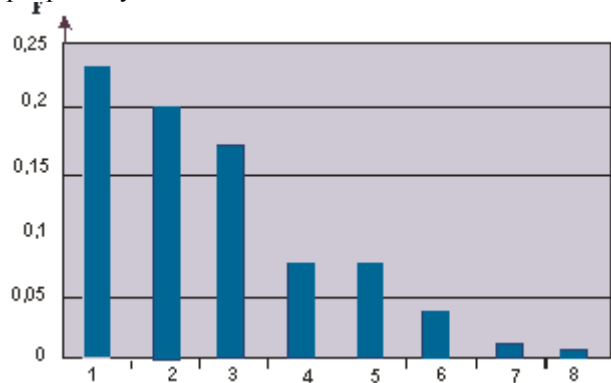


Рис. Розподіл питою частоти відмов по кожному обладнанню підстанцій 330кВ:

- 1 – вимикачі повітряні, 2 – силові трансформатори,
- 3 – роз'єднувачі, 4 – вимикачі оливні, 5 – трансформатори струму, 6 – збірні шини, 7 – трансформатори напруги, 8 – розрядники

Як видно з цього рисунку, найчастіше виходять з нормального режиму роботи вимикачі, силові трансформатори та роз'єднувачі. Така тенденція спостерігається і для обладнання на підстанціях 750кВ і 220кВ.

Для силових трансформаторів на 750 кВ найчастіше відбувається порушення внутрішньої ізоляції – до 43%; на другому місці за значимістю – до 19%, зареєстровано перекриття зовнішньої ізоляції; на третьому місці – потрапляння птахів і сторонніх предметів – до 14%; близько 10% відмов трансформаторів викликані пошкодженням високовольтних вводів і опорних ізоляторів. У той же час, для трансформаторів класу 330кВ на перше місце по вагомості причин відмов виходить пошкодження високовольтних вводів – до 44%; на внутрішні КЗ відносять відмови – до 20%, на перекриття і руйнування опорних ізоляторів – до 5%.

Вагомі складові причин відмов роз'єднувачів для різних класів також значно відрізняються між собою.

В цілому, якщо ранжувати причини аварій на підстанціях за рівнем пошкоджуваності елементів, то можна скласти наступну послідовність:

- 1 – внутрішня ізоляція трансформаторів;
- 2 – високовольтні вводи;
- 3 – приводи комутаційних апаратів;
- 4 – опорні ізолятори;
- 5 – дугогасильні камери;
- 6 – гумові ущільнення високовольтних вимикачів;
- 7 – порожністі дроти.

Спираючись на виявлені порушення нормального режиму експлуатації обладнання, слід зауважити, що зростає роль наявності високоякісного релейного захисту в системі. Релейний захист і протиаварійна автоматика виконують свої функції на

вимогу, якою є КЗ або інші порушення нормально-го режиму роботи об'єкта. Тому необхідно розрізняти відмову пристроїв захисту та автоматики як подію втрати працездатності та відмови функціонування, як подію невиконання заданої функції при виникненні відповідної вимоги. В загальному випадку відмова пристрою відбувається не одночасно із виникненням вимоги до функціонування та, отже, відмова функціонування може бути відвернена, якщо в інтервалі між моментом виникнення відмови й моментом виникнення вимоги буде проведена профілактична перевірка. Тому потік відмов функціонування залежить не тільки від потоку відмов пристрою, але й від організації технічного обслуговування, а, отже, і від якості проведення перевірки. Таким чином, оскільки відмова пристрою може перетворитися у відмову функціонування лише при виникненні вимоги до функціонування, потік відмов функціонування залежить від потоку вимог до функціонування [1].

Зазвичай в електричній частині енергосистеми терміни «пошкодження» і «коротке замикання» є синонімами, хоча, це не завжди так. КЗ завжди є пошкодженням, а пошкодження не завжди є коротким замиканням. Наприклад, обрив фази – це пошкодження, але не КЗ. Як виключення, до пристроїв РЗ відносяться деякі пристрої, що призначені не для виявлення та вимикання пошкодженого електроустаткування, а для виявлення ненормальних режимів роботи електроустаткування (наприклад, захист від перевантаження трансформатора). Крім того, у деяких випадках, які не вимагають швидкого автоматичного відключення пошкодженого устаткування, пристрої РЗ можуть діяти не на вимикання, а на сигнал (наприклад, захист від замикань на землю в мережах із ізольованою нейтраллю).

Підвищення надійності системи РЗА є ефективним заходом запобігання аварійних наслідків, які викликані відмовами в її функціонуванні. Більшість фірм виробників устаткування РЗА припиняють випуск електромеханічних реле і пристроїв і переходять на цифрову елементну базу. Перехід на нову елементну базу не приводить до зміни принципів релейного захисту і електроавтоматики, а тільки розширює їх функціональні можливості, спрощує експлуатацію та знижує її вартість [2].

Висновки. Виконано аналіз роботи силових трансформаторів, що входять до складу енергосистеми. Визначено причини та характер ушкоджень елементів системи, розглянуто питання надійності електропостачання енергосистеми в цілому і, зокрема, від якості роботи трансформаторів.

Узагальнюючи, можна зауважити, що пошкоджуваність трансформаторів безпосередньо впливає на надійність енергосистеми в цілому, тому необхідно приділяти особливу увагу щодо підтримання їхньої працездатності.

Аналіз статистики пошкоджуваності силових трансформаторів дозволяє стверджувати про динаміку підвищення аварійності внаслідок суттєвого

ступеня зношеності та закінчення ресурсу їх функціонування. Є необхідність у вдосконаленні моніторингу і діагностики їхнього стану задля забезпечення ефективного прийняття рішень щодо стратегії їх експлуатації або заміни.

Підвищення надійності роботи трансформаторів є ефективним заходом запобігання аварійних наслідків в системі ОЕС України. Таке підвищення багато в чому забезпечується покращенням роботи РЗА.

Література

1. ГКД 34.35.604-96 Технічне обслуговування пристроїв релейного захисту, протиаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації електричних станцій і підстанцій 110 кВ - 750 кВ. Правила [Текст]. – Київ: 1996р. – 116 с.
2. Бун'ко В. Я. Аналіз методів та засобів підвищення надійності елементів релейного захисту. Технологический аудит и резервы производства — № 3/1(23), 2015 С.26-30.
3. СОУ НЕК стандарт підприємства 20.261:2018 Технічна політика ДП "НЕК"УКРЕНЕРГО" у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж. [Текст]. – Київ: 2018. – 119 с.
4. Дар К.Е. Статистические данные по аварийности энергетического оборудования распределительных устройств 220 кв и выше / К.Е. Дар, В.Н. Таран // Вісники НТУ ХП. – 2010.– Вісник № 45.– С. 111-115.
5. Плешков П. Г. Організація системи моніторингу силових трансформаторів / П. Г. Плешков, В. Ф. Мануйлов, І. В. Савеленко // Наукові записки : зб. наук. пр. - Кіровоград : КНТУ, 2010. - Вип. 10, ч. 2. - С. 250-255.
6. Wallnerström С., Hilber P., Stenberg S. Asset management framework applied to power distribution for cost-effective resource allocation. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014. Vol. 24(12). P. 1791–1804.
7. Бардик Є. І. Імовірно-статистичне моделювання ЕЕС для оцінки ризику відмови силового трансформатора при короткому замиканні в електричній мережі / Є. І. Бардик, М. В. Костерев, М. П. Болотний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Вінниця. – 2016.– С.105–109.

References

1. HKD 34.35.604-96 Tekhnichne obsluhovuvannya prystroyiv releynoho zakhystu, protyavariynoyi avtomatyky, elektroavtomatyky, dystantsiynoho keruvannya ta syhnalizatsiyi elektrychnykh stantsiy i pidstantsiy 110 kV - 750 kV. Pravyla [Tekst]. – Kyiv: 1996r. – 116 s.
2. Bun'ko V. YA. Analiz metodiv ta zasobiv pidvyshchennya nadiynosti elementiv releynoho zakhystu. Tekhnolohycheskyu audyt y rezervy proyzvodstva — № 3/1(23), 2015 S.26-30.
3. SOU NEK standart pidpryyemstva 20.261:2018 Tekhnichna polityka DP "NEK"UKRENERHO" u sferi rozvytku ta ekspluatatsiyi mahistral'nykh ta mizhderzhavnykh elektrychnykh merezh. [Tekst]. – Kyiv: 2018. – 119 s.

4. Dar K.Ye. Statisticheskiye dannyye po avariynosti energeticheskogo oborudovaniya raspredelitel'nykh ustroystv 220 kv i vyshe / K.Ye. Dar, V.N. Taran // Visniki NTU KHPÍ. – 2010. – Visnik № 45. – S. 111-115.
5. Plyeshkov P. H. Orhanizatsiya systemy monitorynhu sylovykh transformatoriv / P. H. Plyeshkov, V. F. Manuylov, I. V. Savelenko // Naukovi zapysky : zb. nauk. pr. - Kirovohrad : KNTU, 2010. – Vyp. 10, ch. 2. – S. 250-255.
6. Wallnerström C., Hilber P., Stenberg S. Asset management framework applied to power distribution for cost-effective resource allocation. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014. Vol. 24(12). P. 1791–1804.
7. Bardyk YE. I. Imovirnisno-statystychnye modelyuvannya EES dlya otsinky ryzyku vidmovy sylovoho transformatora pry korotkomu zamykanni v elektrychniy merezhi / YE. I. Bardyk, M. V. Kosteryev, M. P. Bolotnyy // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho institutu. Vinnytsya. – 2016. – S.105–109.

Filimonenko N. M., Filimonenko K. V. Power system reliability analysis regarding of power transformers being part of it

The article is dedicated to the results of a study on the operation of Power Transformers, which are part of the UES of Ukraine. The causes and nature of damage of system elements are considered, the issues of reliability of power supply of the power system in general, in particular from the quality of Power Transformers are considered. Damage of transformers that are in the composition of the Power Electrical System effect on the reliability of the Power System as a whole, so it is necessary to pay special attention to monitoring their condition and urgent replacement.

Improving the reliability of Relay Protection Systems is an effective measure to prevent emergency systems that have caused its failure. Most of Relay Protection and Automatic Equipment manufacturers stop producing electromechanical relays and devices and change-over to digital element base.

The change-over to a new element base does not change the principles of relay protection and electrical automation, but only expands its functionality, in order to operate and use its value.

Take into account the large number of equipment and High-Voltage Devices for various purposes, which are at the System of the Substation Power Network, when assessing the reliability of the substation as an indicator is taken as the specific failure rate of one substation. Is proven that Switches, Power Transformers and Disconnectors most often go out of normal operation. This trend is also observed for equipment at 750 kV and 220 kV substations. 131 Transformer Substations of voltage class 220,0 kV and higher are in operation in the Power Systems of Ukraine. Each of the them is characterized by working conditions, characterized by climatic conditions, the degree of pollution of the equipment environment, means and control, the timeliness of preventive maintenance and more.

The condition of Transformers provides efficiency for the reliability of the Power System as a whole, so it is necessary to pay special attention to maintaining their operation. Improving the reliability of the Transformers is an effective measure to prevent accidents in the UES of Ukraine.

Key words: reliability of power system, power system, high-voltage devices, power transformers, reliability of relay protection systems.

Філімоненко Ніна Миколаївна – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Філімоненко Костянтин Вадимович – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Стаття подана 19.08.2021.