

СТРАТЕГІЯ ІСТОТНОГО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ 6–35 кВ З ОБМОТКАМИ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Никонець Л.О., Федів Є.І., Молнар М.М.
Національний Університет "Львівська політехніка"
molnarmisi@ukr.net

Between standard levels of isolation of electric equipments that operating experience is the contradiction - isolation which has stocks above permitted standard, is hurt at influence of internal overvoltages. It is revealed new type ferroresonance (resonance) overvoltages caused by excitation of a magnetic stream in the core (windings) by currents of leak of its isolation under action on an electric equipment of internal overvoltages of a network. The program of actions on increase of reliability robots of an electric equipment of electric networks is offered.

Постановка проблеми. В електроенергетиці Росії експлуатується понад 480 тисяч силових трансформаторів 10/0,4 кВ [1]. У зв'язку з недостатнім фінансуванням капітальних ремонтів та оновлення парку трансформаторів понад 70 % трансформаторів працюють з простроченими термінами служби [1], що вимагає обґрунтування їх подальшої працездатності. Щорічно біля 8% загальної кількості трансформаторів що експлуатуються виходять з ладу [1]. Визначальним фактором надійної роботи електрообладнання електричних мереж є надійність роботи його ізоляції. Підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання вимагає поглибленого вивчення реальних умов їх роботи і, зокрема, всіх видів навантажень на ізоляцію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз статистичних даних наведено в табл.1 [1].

Таблиця 1 - Кількість відмов силових трансформаторів 10/0,4 кВ за 10-літній період спостережень в Йошкар-Олінських електромережах і ТЕС-1

Причини відмов	загальне		по місяцях року											
	Кількість	Частка, %	січень	лютий	березень	квітень	травень	Червень	липень	серпень	вересень	Жовтень	листопад	грудень
Ізоляція внутрішня (виткова)	212	55,2	8	4	12	24	32	32	36	16	20	12	12	4
Пробій за внутрішніх перенапруг	132	34,4	8	4	12	16	16	12	12	8	16	12	12	4
Пробій за атмосферних перенапруг	80	20,8	-	-	-	8	16	20	24	8	4	-	-	-
Ізоляція прохідна (вводи, ВН, НН)	26	6,8	1	2	2	4	3	3	3	3	1	1	1	2
Обмотки ВН і НН (міжфазне замикання, перевантаження)	25	6,6	6	-	-	-	-	7	-	-	-	-	6	6
Інші пошкодження (магнітопробід, перемикачі)	10	2,4	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5
Головна ізоляція	60	15,6	2	2	3	7	7	9	11	5	5	2	3	4
Незадовільна експлуатація і старіння ізоляції (місце і причини пошкодження невизначені)	52	13,4	2	2	3	5	5	8	10	4	4	2	3	4

Розподіл відмов за місяцями пошкодження за [1] такий: повздожня ізоляція – 55%, головна ізоляція – 16%, ізоляція вводів – 6,8%. Причинами відмов є грозові(20,8%) та комутаційні (34,4%) перенапруги, незадовільна експлуатація та старіння ізоляції. Таким чином можна зробити висновок, що визначальна частка відмов трансформаторів пов'язана з пошкодженням внутрішньої ізоляції.

Задача дослідження. Проаналізувати умови роботи внутрішньої ізоляції трансформаторів та розробити стратегію істотного підвищення надійності роботи електрообладнання класу 6 – 35 кВ з обмотками ВН.

Виклад основного матеріалу дослідження. На всіх етапах розвитку електроенергетики розроблялися нормативні вимоги до рівней ізоляції електрообладнання [2-8]. Послідовне прийняття згаданих документів відображало наявний рівень знань. Рівні ізоляції електрообладнання згідно вимог[4-8] встановлені з урахуванням захисних характеристик вентильних розрядників та груп [9, 10]. Вимоги [4-6] проаналізовані в [11]. Цей аналіз актуальний і сьогодні, бо нормативи [7-8] для розгляданого класу обладнання не відрізняються від нормативів [4-6]. Згідно з [11] в [2-5] нормовані випробувальні напруги для обладнання з нормальною ізоляцією класу до 220 кВ включно за умови обмеження внутрішніх перенапруг не вимагають обов'язкового застосування розрядників. Кратність розрахункових внутрішніх пере-

напруг для обладнання класів напруги 3-35 кВ за [11] коливається в межах від 5,2 і 3,8, а для напруг класу 110, 220, 330, 500 кВ відповідно 3; 3; 2,7; 2,5. В [4, 5] амплітуди розрахункових внутрішніх перенапруг не були віднесені до якоїсь конкретної форми дії. Було визначено, що розрахункова перенапряга еквівалентна короткочасній дії (0,1с) напруги частотою 50 Гц з тією самою амплітудою. Наведені значення розрахункових внутрішніх перенапруг стосуються ізоляції відносно “землі”. Внутрішні перенапряги в порівнянні з імпульсними характеризуються повільною зміною напруги, тому на повздовжню ізоляцію вони не діють. Розрахунковий рівень внутрішніх перенапруг для міжфазної ізоляції класу до 220 кВ включно не фіксовано, для цієї ізоляції визначальними є імпульсні випробувальні напруги [11]. За наведеними значеннями розрахункових внутрішніх перенапруг визначаються випробувальні напруги промислової частоти в нормованих умовах.

Електрична міцність внутрішньої ізоляції за дії внутрішніх перенапруг вище за міцність у випадку дії випробувальної однохвилинної напруги промислової частоти. Тому для нормування випробувальної напруги розрахункова перенапряга зменшується діленням на коефіцієнт імпульсу k_i (табл.2) [11].

Таблиця 2 - Коефіцієнти імпульсу k_i головної ізоляції обмоток силових олійних трансформаторів, використані ГОСТ 1516-60; однократна взаємодія напруги

Клас напруги обмотки, кВ	3-15	20	35	110-220
k_i для внутрішніх перенапруг; еквівалентна тривалість 0,1 с	1,3	1,3	1,3	1,35
k_i для повної хвилі 1,5/40 мксек і цієї хвилі, зрізаної після 2-3 мксек дії	1,75	1,9	2,0	2,2

Випробувальні напруги промислової частоти, що встановлені [4,5] як еквівалентні розрахунковим внутрішнім перенапрягам, перевірялися на відповідність нормованим імпульсним випробувальним напругам. Необхідності в цієї відповідності не було б, якщо імпульсному випробуванню піддавався кожен виготовлений екземпляр електрообладнання. Оскільки це випробування лише типові, то вважається що напруга промислової частоти за контрольних випробувань також повинна бути еквівалентній імпульсній випробувальній напрузі. Для силових трансформаторів та трансформаторів напруги співставленням випробувальних напруг імпульсних та промислової частоти враховується електрична міцність внутрішньої ізоляції відносно “землі”, а не повздовжньої ізоляції обмоток.

В [4,5] імпульсні випробувальні напруги внутрішньої ізоляції трансформаторів збільшені порівняно з розрахунковими атмосферними перенапрягами введенням коефіцієнту кумулятивності (табл.3), який враховує старіння внутрішньої ізоляції за час її експлуатації [11].

Таблиця 3 - Коефіцієнти кумулятивності прийняті у довоєнних проектах стандарту на рівні ізоляції, а також в ГОСТ 1516-60та ГОСТ 1516-68 для внутрішньої масляної ізоляції трансформаторів, реакторів та апаратів 3-220 кВ при взаємодії імпульсної напруги

Клас напруги електрообладнання, кВ	Коефіцієнт кумулятивності для хвилі	
	повної	Зрізаної
3 – 35	1,15	1,15
110 – 220	1,1	1.15

Застосування в стандартах [4-8] вищих випробувальних напруг для трансформаторів напруги 3 -35 кВ в порівнянні з випробувальними напругами силових трансформаторів пояснюється тим, що трансформатори напруги є елементом захисту силових трансформаторів – дорожчого обладнання.

В табл.4 співставлені нормовані [4,5] значення однохвилинних випробувальних напруг з однохвилинними напругами, що еквівалентні розрахунковим внутрішнім перенапрягам та випробувальній напрузі зрізаної хвилі, для внутрішньої ізоляції трансформаторів (силових та напруги) класу 3 – 35 кВ. Відповідні дані для класу напруг 110 – 220 кВ наведено в табл.5 [11]. Аналізуючи дані табл.4 можна дійти висновку, що нормована однохвилинна випробувальна напруга гарантує можливість збільшення допустимої кратності розрахункових внутрішніх перенапруг у співвідношенні еквівалентних випробувальних напруг за умовами імпульсних дій та внутрішніх перенапруг. Так, наприклад, для трансформаторів класу 10 кВ допустима кратність внутрішніх перенапруг 6,3.

Для випробувань повздовжньої ізоляції обмотки проводиться додаткове випробування трансформатора, який збуджується в режимі неробочого ходу напругою вдвічі більшою від номінальної. Для зменшення струму неробочого ходу випробування проводиться на частотах 100 – 400 Гц. Тривалість випробувальної напруги t , с залежить від частоти $f \geq 100$ Гц. $t = 6000/f \geq 15$ с. Це випробування гарантує надійну роботу ізоляції як в нормальному експлуатаційному режимі так і за дії імпульсних перенапруг [11]. За час після публікації [11] розвиток нормативної бази відбувався у напрямі встановлення вимог [7,8,10] щодо забезпечення стійкості до дії робочої напруги, та регламентації випробувань комутаційним імпульсом, що відтворює реальну форму внутрішніх перенапруг (для напруг ≥ 330 кВ). Прогрес в створення досконаліших розрядників [10] обумовив можливість зменшення випробувальних напруг зрізаною хвилею для трансформаторів 150, 220 кВ відповідно до 600 та 835 кВ, а нормованих однохвилинних напруг до 230 та 325 кВ [7].

Аналізуючи дані табл.3-4 приходимо до висновку, що за умови дії внутрішніх перенапруг, природа яких відома, ізоляція електрообладнання з обмотками високої напруги класу 3 – 35 кВ має значні невикористані резерви, що робить неможливим її пошкодження. Тим більше цей висновок стосується електромагнітних трансформаторів напруги, рівень ізоляції яких вище за рівень ізоляції силових трансформаторів.

Будь-яке погіршення стану ізоляції через її старіння має проявити себе в першу чергу за дії імпульсних перенап-

Таблиця 4 - Випробувальні однохвилинні напруги внутрішньої ізоляції відносно землі силових трансформаторів, шунтівних і заземлюючих реакторів класу напруги 3-35 кВ

Клас напруги, кВ	3	6	10	15	20	35	
Найбільша робоча напруга, кВ (a)	3,5	6,9	11,5	17,5	23	40,5	
Кратність розрахункових внутрішніх перенапруг(b)	5,2	4,6	4,25	4,25	4,25	3,8	
Випробувальна напруга зрізаної хвилі, кВ (c)	50	70	90	120	150	225	
Коефіцієнт імпульсу головної ізоляції для зрізаної хвилі (d)	1,75	1,75	1,75	1,75	1,9	2	
Однохвилинна напруга (кВ), еквівалентна	b і рівна $a \cdot b / (1,3 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{3})$	9	15,7	24	36,8	48,5	76
	c і рівна $c / (d \cdot \sqrt{2})$	20,2	28,3	36,3	48,5	56	80
Нормована однохвилинна випробувальна напруга, кВ	18	25	35	45	55	85	

Таблиця 5 - Випробувальні однохвилинні напруги внутрішньої ізоляції відносно землі трансформаторів (силових і напруги) і шунтівних реакторів класу 110-220 кВ. (захист вентильними розрядниками типу PBC)

Клас напруги, кВ	110	150	220	
Найбільша робоча напруга, кВ (a)	126	172	252	
Кратність розрахункових внутрішніх перенапруг(b)	3			
Випробувальна напруга зрізаної хвилі, кВ (c)	550	760	1090	
Однохвилинна напруга (кВ), еквівалентна	b і рівна $a \cdot b / (1,35 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{3})$	180	246	359
	c і рівна $c / (2,2 \cdot \sqrt{2})$	177	244	350
Випробувальна напруга в проєкті стандарту(1949р), кВ	180	250	360	
Нормована однохвилинна випробувальна напруга, кВ	200	275	400	

руг природного походження. Встановити прояв такого системного фактора як старіння ізоляції дуже легко, аналізуючи зміну потоку відмов трансформаторів за місяцями звітного року в порівнянні з аналогічним показником минулих років. Найбільше відмов має припадати на місяці інтенсивної грозової діяльності. Якщо вказаного явища не зареєстровано, причини пошкодження трансформаторів всіх видів мають бути іншими.

Висновки з аналізу [11] не підтверджуються даними експлуатації [1], що наведені в табл.1, а також даними [12] щодо ймовірності виникнення внутрішніх перенапруг в мережах з розземленою нейтраллю. Згідно [12] внутрішні перенапруги в розподільчих мережах 3 – 35 кВ можна поділити на 3 групи: дугові, комутаційні та ферорезонансні. Автоматична реєстрація в різних мережах 3 – 35 кВ (в 35 точках, число осцилограм – біля 12000) показала, що на однофазні замикання на землю припадає в середньому перенапруг – 77%, на комутаційні – 17%, на решту, в тому числі ферорезонансні та комбіновані – 6%. Середній час між перенапругами становить 2,5 діб. Кратність перенапруг під час однофазних замикань в основному лежить в межах 1,7 – 2,2. Максимальна зареєстрована кратність не перевищує 3,4. Комутаційні перенапруги, як правило, не перевищують значення 2,5. Виняток – перенапруги під час комутації ненавантажених трансформаторів (– до 6,5). Максимальні зареєстровані перенапруги, які є наслідком ферорезонансних явищ не перевищують кратності 5 – 6.

Таким чином можна зробити висновок, що основна маса внутрішніх перенапруг не становить загрози ізоляції, а рідкі перенапруги великої кратності повинні обмежити вентильні розрядники, виконані за [10].

Проведені нами дослідження [13, 14] виявили можливість виникнення перенапруг, обумовлених збудженням магнітного потоку струмами витоку ізоляції трансформаторів, що значно більші розрахункових значень. Дію цих перенапруг не лише на головну, але і на повздовжню ізоляцію принципово неможливо обмежити розрядниками, встановленими ззовні трансформаторів. Розроблено метод обмеження перенапруг цієї природи [15, 16].

Парадоксальність ситуації стосовно електрообладнання з обмотками високої напруги класу 110 кВ і вище полягає в тому, що завдяки прогресу в розробленні розрядників та обмежувачів перенапруг вдалося суттєво знизити значення випробувальних напруг та відповідно рівень ізоляції електрообладнання. Але за однакових зі старим обладнанням кратностей перенапруг нового типу [13, 14] ймовірність пошкодження нового обладнання повинна бути суттєво більшою!!! Крім того встановлено [13, 14] що розподіл випробувальної напруги між елементами ізоляції електрообладнання залежить суттєво від частоти, що ставить під сумнів доцільність випробування ізоляції напругою частотою 50 Гц. Кардинального підвищення надійності роботи електрообладнання з обмотками високої напруги можна досягнути лише за умов ретельного вивчення електрофізичних властивостей системи “ізоляція – обмотка” кожного типорозміру обладнання та умов його експлуатації в конкретному вузлі електромережі.

Стратегія підвищення надійності роботи електрообладнання з обмотками високої напруги (ЕОВН) полягає у послідовному виконанні для кожного з вузлів електромережі наступних кроків:

1. Провести експериментальне дослідження частотних характеристик кожного виду ЕОВН.
2. На основі отриманих частотних характеристик створити адекватні математичні моделі кожного виду ЕОВН.
3. За допомогою математичних моделей уточнити власні резонансні частоти ЕОВН з урахуванням умов робочого режиму електромережі для одержання дискретного набору небезпечних резонансних частот для кожного з видів ЕОВН.
4. Розробити математичну модель електромережі, за допомогою якої виявити спектр власних резонансних частот мережі в різних розрахункових режимах її роботи.
5. Шляхом порівняння спектрів власних резонансних частот електрообладнання і електромережі виявити діапазони збіжності резонансних частот.
6. У випадку збіжності резонансних частот ЕОВН і мережі розробити ком-

плекс заходів для зміни резонансної частоти електромережі. 7. Вирішення проблеми підвищення надійності роботи ЕОВН пропонується проводити поетапно: спочатку охопити най розповсюджені електромережі напругою 6-10 кВ, потім – 35 кВ, 110 кВ і вище.

Висновки:

1. Між нормованими рівнями ізоляції електрообладнання з обмотками ВН класу 6-35 кВ та досвідом експлуатації ізоляції існує протиріччя – ізоляція яка має великі наднормативні запаси пошкоджується за дії внутрішніх перенапруг (повздовжня в першу чергу).

2. Виявлено існування нового типу ферорезонансних (резонансних) перенапруг, обумовлених збудженням магнітного потоку в магнітопроводі (обмотках) електрообладнання струмами витоку його ізоляції під дією на електрообладнання внутрішніх перенапруг мережі, частота вільних коливань яких збігається з резонансною частотою системи “ізоляція – обмотка” електрообладнання. Принциповою особливістю виявленого явища є неможливість обмеження перенапруг на ізоляції електрообладнання за допомогою розрядників встановлених ззовні, бо перенапруги розвиваються всередині об’єму ізоляції.

3. Запропонована програма дій щодо підвищення надійності роботи в мережах електрообладнання з обмотками високої напруги класу 6 – 35 кВ. Практична реалізація програми унеможливить пошкодження електрообладнання з обмотками високої напруги за дії внутрішніх перенапруг, що зменшить результуючу пошкоджуваність приблизно на одну третину.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик “Электричество” №5 Москва 2005.
2. Правила и нормы IX Всесоюзного Электротехнического Съезда (1927). Электротехнические правила и нормы ч. II, НКТП, Главэнерго, Центральный электротехнический совет, Госэнергоиздат, 1933.
3. ГОСТ 1516-42, Напряжения испытательные и разрядные высоковольтных трансформаторов, аппаратов и изоляторов, предназначенных для установок, связанных с воздушными сетями, Стандартгиз, 1942.
4. ГОСТ 1516-60, Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности изоляции, М., 1963.
5. ГОСТ 1516-68, Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности изоляции, М., 1968.
6. ГОСТ 1516.1-76, Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
7. ГОСТ 1516.3-96, Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции, Киев, Госстандарт Украины, 1999.
8. ГОСТ 1516.2-97, Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение 3 кВ и выше, общие методы испытаний электрической прочности изоляции. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск.
9. ГОСТ 10257-62, Разрядники вентильные с магнитным гашением для защиты изоляции электрооборудования переменного тока напряжением от 3 до 500 кВ. Технические требования, Стандартгиз, 1962.
10. ГОСТ 16357-83, Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия.
11. А.В. Сапожников, Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения, 296 стр., “Энергия”, Москва, 1969. Богатенков И.М., Карабанов А.В., Костенко М.В., Михайлов Ю.А., Халилов Ф. Х. Перенапряжения и защита от них в сетях с изолированной нейтралью или с дугогасящей катушкой. Академия наук СССР, отделение физико-технических проблем энергетики, Научный Совет по комплексной проблеме “Научные основы электрофизики и электроэнергетики”, Таллинский политехнический институт, Эстонское республиканское правление НТОЭ и ЭП. Тезисы рабочего совещания IV секции Научного Совета по теоретическим и электрофизическим проблемам повышения надежности и долговечности изоляции сетей с изолированной нейтралью. Таллин 1981.
12. Никоненко Л. О., Федів С. І, Молнар М. М. Фізичні явища в електрообладнанні з обмотками високої напруги “Енергетика та електрифікація” №3 Київ, 2008.
13. Небезпечні внутрішні перенапруги на елементах комбінованої ізоляції Бубряк А.Е., Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Львів 2006.
14. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2006140027/28(043642) “Способ неразрушающей диагностики предаварийного состояния электрооборудования с обмотками высокого напряжения”, авторы Никоненко Л.А., Бубряк А.Е, UA, 20 декабря 2007 года, Роспатент, Федеральное государственное учреждение “Федеральный институт Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам” (ФГУФИПС), Москва.
15. Державне підприємство “Український інститут промислової власності”. Рішення про видачу патенту на винахід від 19 березня 2008 року №4238/1 по заявці а2006 08055 “Спосіб неруйнівної діагностики перед аварійного стану електрообладнання з обмотками високої напруги”, дата подання 17.07.2006р., автори Никоненко Л.О., Бубряк А.Е

Рекомендовано д.т.н. Заболотним І.П.