

Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 621.313.33:8

П.Ф. Буданов, Ю.О. Ясинський, А.І. Хіміч

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

У статті сформульовані основні вимоги до проведення імпульсних випробувань ізоляції обмоток високовольтних електродвигунів і запропоновано метод профілактичних комбінованих випробувань ізоляції обмоток, що найбільш повно враховує комплекс цих вимог. Викладена сутність методу оцінки профілактичних випробувань підвищеною напругою й розглянута можливість оцінки ефективності профілактичних випробувань ізоляції високовольтних електродвигунів з використанням графоаналітичного методу.

Ключові слова: високовольтні електродвигуни, ізоляція обмоток, метод випробувань, метод оцінки ефективності випробувань.

Вступ

Постановка проблеми і аналіз публікацій. Відомі методики вибору параметрів профілактичних випробувань ізоляції високовольтних електродвигунів (ВЕД) підвищеною напругою не враховують основних експлуатаційних навантажень на ізоляцію. У процесі експлуатації ізоляція ВЕД перетерплює необоротні зміни за рахунок одночасної дії на неї декількох видів експлуатаційних навантажень (електричне поле, тепло, механічні впливи). Електричне поле значною мірою проявляє себе у ВЕД, тому оцінка ефективності їх профілактичних випробувань є необхідною умовою підвищення якості ВЕД.

Вплив експлуатаційних навантажень на ізоляцію можна оцінювати по декількох параметрах і характеристиках ізоляції ВЕД [1 – 4]. За такий параметр найчастіше приймають короточасну пробивну напругу ізоляції $U_{пр}$. Це пов'язане з тим, що зміна параметра $U_{пр}$ відбиває працездатність ізоляції ВЕД в більшій мірі, чим інші параметри (наприклад, опір ізоляції). Параметр $U_{пр}$ виявляє всі слабкі місця в ізоляції й характеризує безпосередньо рівень її електричної міцності, чого не можна одержати при аналізі інших параметрів і характеристик ізоляції без проведення додаткових розрахунків.

Середньостатистичні дані, які зібрані авторами робіт [1 – 5], говорять про те, що на частку ушкоджень виткової ізоляції обмоток ВЕД доводиться до 25 % від загальної кількості ушкоджень цих електродвигунів, а на частку ушкоджень корпусної ізоляції – до 12 % від того ж числа. Тому важливим завданням є розробка методів діагностики ізоляції обмоток ВЕД, включаючи профілактичні її випробування. Перспективними в цьому напрямку є роз-

робки комбінованих методів діагностики ізоляції обмоток – як корпусної, так і виткової. Зокрема, важливим у цьому напрямку є розробка комбінованих методів і способів профілактичних випробувань у комплексі як корпусної, так і виткової ізоляції.

При розробці таких методів необхідно враховувати наступне: корпусна й виткова ізоляція обмоток ВЕД мають значні запаси електричної міцності, якщо в них відсутні місцеві розвинені дефекти; місцеві розвинені дефекти різко знижують рівень електричної міцності корпусної й виткової ізоляції й роблять можливими пробіи ізоляції навіть при робочій напрузі; на корпусну й виткову ізоляцію ВЕД впливають внутрішні перенапруги, що значно перевищують величини робочих напруг; при впливі внутрішніх перенапруг на обмотки ВЕД ізоляція цих обмоток може бути пробита не тільки в місцях зосередження грубих місцевих дефектів, але й при менш значних її ослабленнях.

Відомо, що для ВЕД напругою 6 кВ середня імпульсна міцність нової виткової ізоляції становить 12-20 кВ або $(2,5-4,1)U_{фм}$, мінімальна імпульсна міцність становить 4,1-10,4 кВ або $(0,84-2,1)U_{фм}$ (де $U_{фм}$ – амплітуда фазної напруги обмотки, кВ).

Для виткової ізоляції, що була в експлуатації, середня імпульсна міцність становить 10,6-18 кВ, або $(2,1-3,8)U_{фм}$, а мінімальна – 5,7-8,8 кВ, або $(1,1-1,6)U_{фм}$ [1, 2].

Таким чином, для ВЕД напругою 6 кВ (як нових, так і колишніх в експлуатації) середня імпульсна міцність виткової ізоляції значно вище амплітуди фазної напруги машини, а мінімальна – близька до неї. Мінімальні значення імпульсної міцності виткової ізоляції, отримані при великій кількості випробувань ізоляції великого обсягу зразків, у першому набли-

женні можуть бути прийняті за мінімальну міцність виткової ізоляції всієї обмотки машини [1, 2].

Встановлено, що для всіх характерних типів виткової ізоляції, що пройшли імпульсні випробування, що при збільшенні крутості хвилі імпульсної іспитової напруги від 4 до 160 кВ/мкс імпульсна міцність збільшується приблизно на 15...30 % [2].

Додатковим параметром, що у цьому випадку можна використовувати є коефіцієнт імпульсу K_i , який визначається співвідношенням амплітуди пробивної імпульсної напруги до амплітуди пробивної напруги на частоті 50 Гц.

Метою статті є обґрунтування методики вибору параметрів профілактичних випробувань ізоляції ВЕД з обліком основних експлуатаційних навантажень на ізоляцію та розробка методу оцінки профілактичних випробувань ізоляції підвищеною напругою.

Основний матеріал

1. Вибір параметрів профілактичних випробувань. Розглянуті вище передумови дозволяють сформулювати основні вимоги для розробки методу комбінованих профілактичних випробувань ізоляції обмоток ВЕД: величини іспитових напруг повинні бути такими, щоб при випробуваннях виявлялися не тільки грубі розвинені дефекти, але й менш небезпечні ослаблені місця, у яких при подальшій експлуатації можуть розвинути грубі зосереджені дефекти; випробування повинні проводитися без яких-небудь часткових розбирань ВЕД після відключення його від мережі; метод повинен забезпечувати створення необхідних величин імпульсних іспитових напруг на корпусній і виткової ізоляції на всіх частинах випробуваної обмотки.

Необхідні величини виткових іспитових напруг можуть бути розраховані, виходячи із заданого значення U_{\max} по формулі (1):

$$U_{\text{вит}} = \frac{U_{\max} \cdot K_{\phi}}{n_{\text{вит}}}, \quad (1)$$

де $U_{\text{вит}}$ – міжвиткова напруга; $n_{\text{вит}}$ – кількість витків; K_{ϕ} – коефіцієнт загасання величини імпульсної напруги по довжині обмотки.

Формула (1) дозволяє визначити величину напруги $U_{\text{вит}}$ у будь-якій частині обмотки, задаючись значеннями K_{ϕ} .

Сутність даної методики складається у використанні двох основних характеристик ізоляції: “кривій терміну служби” і кривої залежності пробивної напруги від часу й величини прикладеної напруги. З достатньою для діагностики електроустаткування точністю обидві ці характеристики ізоляції можуть бути побудовані по даним оцінних випробувань зразків нової ізоляції й даним експлуатації електроустаткування з використанням таких виразів:

$$\lg T_{\text{сл}} = \lg C_c - (U/B_e) \lg e, \quad (2)$$

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр.о.}} - B_e \ln T_{\text{сл}}, \quad (3)$$

$$k_{xi} = it_{\text{исп}} \exp(-U_{\text{пр.0}}/B_e) \sum_{i=1}^T \exp(-U_{\text{исп.i}}/B_e), \quad (4)$$

де $T_{\text{сл}}$ – термін служби ізоляції, років; C_c – коефіцієнт, що залежить від конструкції ізоляції; U – прикладена напруга, кВ; B_e – швидкість спаду пробивної напруги, кВ/год; $U_{\text{пр}}$ – поточне значення пробивної напруги, кВ; $U_{\text{пр.о.}}$ – початкове значення пробивної напруги, кВ; k_{xi} – коефіцієнт, що характеризує частину від повного строку ізоляції, що відповідає тривалості додатка іспитової напруги $t_{\text{исп}}$ при i -тім випробуванні; $U_{\text{исп.i}}$ – величина іспитової напруги при i -тім випробуванні.

З вираження (4) з'ясовується, що ймовірність пробою ізоляції в процесі проведення її профілактичних випробувань зростає лінійно зі збільшенням часу випробування $t_{\text{исп}}$ і експоненціально із зростанням величини іспитової напруги $U_{\text{исп.i}}$. Отже, для збільшення ефективності випробувань, що буде підвищуватися у випадку, якщо зростає ймовірність пробою ізоляції в процесі випробувань (а не в умовах експлуатації ВЕД), треба збільшувати сумарний час профілактичних випробувань.

За результатами профілактичних випробувань можна визначити ймовірну величину пробивної напруги залежно від поточних значень величини прикладеної напруги U і часу його дії t :

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр.0}} (U_{\text{пр.0}} / U)^{-t/T_{\text{сл}}}, \quad (5)$$

де $T_{\text{сл}}$ – поточне значення терміну служби ізоляції.

Вираз (5) має сенс, якщо $t_0 \leq t$ і $U \leq U_{\text{пр.о.}}$. У момент, коли $U = U_{\text{пр.про}}$, наступить пробій ізоляції. Кожному значенню напруги U відповідає певний термін служби $T_{\text{сл}}$. Для вибору числа профілактичних випробувань і періоду часу між випробуваннями вихідною інформацією є: величина іспитової напруги $U_{\text{исп.i}}$, час випробування $t_{\text{исп}}$, максимальний інтервал часу між першим і останнім (планованим) випробуванням T_{\max} , де пробивна напруга буде менше іспитового. Для визначення проміжку часу T_{\max} будемо виходити з передумови, що між сусідніми випробуваннями не повинне відбуватися аварійного пробою ізоляції. Тоді:

$$\Delta U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}(T_1) - U_{\text{пр}}(T_2) = U_{\text{исп1}} - U_{\text{пр.мін}}, \quad (6)$$

де $\Delta U_{\text{пр}}$ – зниження пробивної напруги між сусідніми випробуваннями; T_1, T_2 – відповідно періоди часу, які відповідають початковому й кінцевому випробуванню; $U_{\text{исп1}}$ – величина іспитової напруги при першому профілактичному випробуванні; $U_{\text{пр.мін}}$ – мінімальна електрична міцність ізоляції.

Для використання вираження (6) необхідно враховувати наступні припущення: між першим й останнім профілактичними випробуваннями ізоляція постійно перебуває під впливом робочої напруги; надмірні по величині внутрішні перенапруги на електроустаткування в цей період відсутні.

У момент часу T_1 максимальне значення іспитової напруги $U_{\text{исп}}$ визначиться як

$$U_{\text{исп.макс.}} = U_{\text{пр.0}}(U_{\text{пр.0}} / U_{\text{ф}})^{-T_1/T_{\text{сл.н.}}} \quad (7)$$

У момент часу T_2 мінімальна пробивна напруга ізоляції $U_{\text{пр.мін}}$ визначиться як:

$$U_{\text{исп.мін}} = U_{\text{пр.0}}(U_{\text{пр.0}} / U_{\text{ф}})^{-T_2/T_{\text{сл.н.}}} \quad (8)$$

Із виразів (6) і (7), визначимо період часу $T_{\text{макс}}$:

$$T = \ell n \left(\frac{U_{\text{исп.макс.}}}{U_{\text{пр.мін}}} \right) \cdot \frac{\exp \left(\frac{U_{\text{пр.0}}}{B_e} \right)}{\ell n \left(\frac{U_{\text{пр.0}}}{U_{\text{ф}}} \right)} \quad (9)$$

У вираз (9) входять всі основні вихідні дані, правильні вибір і завдання яких гарантують із імовірністю 0,95 відсутність аварійних пробоїв ізоляції електроустановки протягом часу $T_{\text{макс}}$ між початковим і кінцевим профілактичними випробуваннями.

Як видно з виразів (1) – (3), “криву терміну служби” можна побудувати в напівлогарифмічних координатах у вигляді прямої, що проходить через дві крапки. Першу крапку цієї характеристики можна визначити за статистичними даними про аварійність ізоляції електроустановки (при дії робочої фазної напруги $U_{\text{ф}}$ термін служби ізоляції складе $T_{\text{сл.н.}}$).

Другу крапку “кривої терміну служби” ізоляції можна одержати, використовуючи експериментальні дані по електричній міцності нової ізоляції, які в тім або іншому виді є для кожного типу електроустановки (при однохвилинних випробуваннях може бути отримане значення максимуму іспитової напруги $U_{\text{исп.макс.}}$, або може бути відома величина пробивної напруги $U_{\text{пр.про}}$ у момент уведення ізоляції в експлуатацію). Координати двох точок для побудови “кривої терміну служби” ізоляції будуть такі: – для першої – $U_{\text{исп.макс.}}$, $\ln t_{\text{исп.}}$; для другої – $U_{\text{ф}}$, $\ln T_{\text{сл.н.}}$ (або: $U_{\text{пр.про}}$, $\ln t_{\text{пр.}}$).

2. Оцінка ефективності профілактичних випробувань ізоляції ВЕД підвищеною напругою.

Ефективність профілактичних випробувань доцільно оцінювати по ймовірній кількості пробоїв $N_{\text{прб}}$, що буде змінюватися при зміні параметрів профілактичних випробувань.

Сумарний ефект дії цих постійно діючих навантажень на ізоляцію можна оцінювати по “кривих ефекту” ізоляції, $P(U)$ (рис. 1).

В експлуатації на ізоляцію ВЕД епізодично впливають перенапруги. Їхню дію можна врахувати за допомогою “кривої щільності розподілу величин перенапруг” $\varphi(U_{\text{пер}})$ (рис. 1). Для кожного типу ВЕД ймовірне (розрахункове) кількість пробоїв ізоляції $N_{\text{прб}}$ протягом заданого періоду часу (наприклад, року) визначиться як:

$$N_{\text{прб}} = M_{\text{пер.Г}} \int_{U_p}^{\infty} \varphi(U_{\text{пер}})P(U)dU, \quad (10)$$

де $M_{\text{пер.Г}}$ – загальна кількість перенапруг за рік; U_p – робоча напруга ізоляції, кВ.

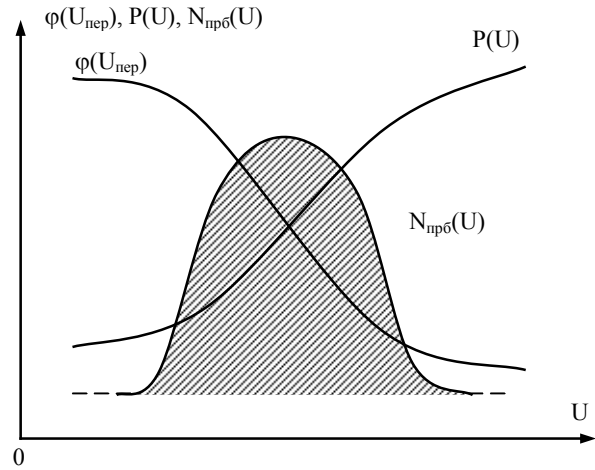


Рис. 1. Визначення вірогідної кількості пробоїв ізоляції $N_{\text{прб}}(U)$ графо-аналітичним способом

При визначенні ефективності профілактичних випробувань ізоляції у вираженні (10) “крива щільності розподілу величин перенапруг” $\varphi(U_{\text{пер}})$ залишається без змін, якщо в плинні декількох років засоби захисту ВЕД від перенапруг залишаються без змін.

“Крива ефекту” $P(U)$ для ізоляції випробуваного ВЕД змінюється залежно від величин іспитової напруги при профілактичних випробуваннях. Крива $N_{\text{прб}}(U)$ по рис. 1 будується по даним “кривої ефекту” $P(U)$ і “кривої щільності розподілу величин перенапруг” $\varphi(U_{\text{пер}})$ по формулі (10).

Висновки

1. Розроблено метод підвищення надійності високовольтних електродвигунів за рахунок інтеграції існуючих методів профілактичних випробувань.
2. Запропонована методика визначення параметрів інтегрованих профілактичних випробувань ізоляції.
3. Для оцінки ефективності інтегрованих профілактичних випробувань ізоляції запропоновано використання графо-аналітичного методу визначення вірогідності кількості пробоїв ізоляції.

Список літератури

1. Бернштейн Л.М. *Изоляция электрических машин общепромышленного применения* / Л.М. Бернштейн. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 367 с.
2. *Внутренние перенапряжения в электрических сетях высокого напряжения переменного тока. (Итоги науки и техники)*. – М.: Изд-во АН СССР, 1964. – 242 с.
3. Ермолин Н.П. *Надежность электрических машин* / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
4. Кулаковский В.Б. *Профилактические испытания и дефекты изоляции электрических машин* / В.Б. Кулаковский. – М.: Энергия, 1970. – 184 с.

Надійшла до редколегії 7.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.І. Канюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

П.Ф. Буданов, Ю.А. Ясинский, А.И. Химич

В статье сформулированы основные требования к проведению импульсных испытаний изоляции обмоток высоковольтных электродвигателей и предложен метод профилактических комбинированных испытаний изоляции обмоток, который наиболее полно учитывает комплекс этих требований. Изложена суть метода оценки профилактических испытаний повышенным напряжением и рассмотрена возможность оценки эффективности профилактических испытаний изоляции высоковольтных электродвигателей с использованием графоаналитического метода.

Ключевые слова: высоковольтные электродвигатели, изоляция обмоток, метод испытаний, метод оценки эффективности испытаний.

RELIABILITY DESIGN METHOD OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC MOTORS

P.F. Budanov, Y.A. Yasinsky, A.I. Himich

This article outlines the basic requirements for the impulse test of insulation of windings high-voltage motors and prevention method of combined tests of isolation windings, which fully takes into account these complex requirements. Is the essence of an estimation method of preventive test of high voltage and the possibility of evaluation of effectiveness of preventive test of insulation of high-voltage electric motors using the graphic-analytical method.

Keywords: high-voltage electric motors, insulation of windings, test method, method of assessing effectiveness testing.