

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ КОРОННОГО РОЗРЯДУ НА ЛЕП В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Доценко М. С.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка**Запропоновано метод визначення тривалості коронного розряду на ЛЕП шляхом вимірювання акустичного випромінювання корони в дроті ЛЕП.*

Постановка проблеми. У зв'язку з переходом оптового ринку електричної енергії України до концепції ринку двосторонніх договорів та балансуєчого ринку виникає проблема визначення параметрів режиму генерації та споживання в реальному часі. Важливим параметром режиму енергосистеми є втрати електричної енергії в її елементах. Втрати електричної енергії на корону в ЛЕП сягають 40% від теплових втрат і потребують самостійного визначення. Важливою при цьому є задача визначення тривалості коронного розряду для відповідних елементів ЛЕП у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно [1] корона на дроті ЛЕП є джерелом акустичного, оптичного та радіовипромінювання. Так, акустичні коливання ультразвукової частоти використовуються для діагностування наявності корони на елементах ЛЕП у приладі [2]. Акустичні коливання звукової частоти використовуються для діагностування наявності корони у елементах розподільчих пристроїв [3]. Причому, запропонований у [3] метод передбачає вимірювання акустичних коливань звукової частоти які розповсюджуються не тільки у повітрі, але й в елементах контрукції розподільчого пристрою. Для діагностування елементів ЛЕП також застосовуються методи вимірювання оптичного випромінювання корони в інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах [4]. Вибір найбільш раціонального методу та засобів визначення тривалості коронного розряду на елементах ЛЕП в задачі розрахунку втрат енергії на корону в реальному часі потребує проведення порівняльного аналізу ефективності існуючих методів вимірювання випромінювання корони.

Мета статті. Визначення найбільш раціонального методу вимірювання тривалості корони.

Основні матеріали дослідження. Перш за все необхідно розглянути елементи ЛЕП як джерела випромінювання. Джерелами випромінювання є коронні розряди які виникають на дроті фази та на елементах підвіски - фарфорових ізоляторах. Найбільшу потужність втрат енергії на корону мають втрати на фазовому дроті при формуванні на ньому розвиненої корони. Тому будь-який метод визначення тривалості випромінювання корони на фазовому дроті повинен забезпечувати фіксацію моменту початку та закінчення випромінювання, а також ділянку дроту фази ЛЕП на якій сформована корона. Для цього необхідно розділити дріт фази ЛЕП на ділянки, за випромінюванням яких буде здійснюватись спостереження. Необхідно також визначити місце розміщення вимірювального пристрою. Для розміщення вимірювального пристрою принципово може бути застосована:

- відповідна опора ЛЕП;
- ділянка на поверхні землі в районі фазового дроту поміж опорами ЛЕП;
- дріт блискавкозахисту.

Найраціональнішим є спосіб розміщення вимірювального пристрою на опорі ЛЕП. Розміщення на ділянці поверхні землі потребує додаткового землевідводу. Застосування дроту блискавкозахисту для розміщення вимірювальних пристроїв може бути застосовано для спостереження за відомими локальними його ланками.

Розміщення вимірювального пристрою на опорі ЛЕП потребує визначення методу вимірювання для кожного з видів випромінювання. Слід звернути увагу на наступну важливу обставину. Акустичне та радіовипромінювання корони принципово може розповсюджуватись у двох середовищах, а саме:

- навколишньому повітряному просторі;
- у дроті фази.

Розповсюдження випромінювання у навколишньому середовищі дає змогу виконувати дистанційне спостереження та вимірювання різними методами в тому числі засобами авіаційного та космічного моніторингу [4]. Для вимірювання будь-якого виду випромінювання корони у навколишньому повітряному просторі необхідно забезпечити прийом випромінювання тільки для відповідної фази. Для цього необхідно мати приймальний пристрій випромінювання з відповідною діаграмою направленості, який приймає випромінювання тільки для відповідного дроту фази. Тільки засоби моніторингу основані на оптичному випромінюванні у різних діапазонах хвиль, дають можливість точно ідентифікувати дріт фази на якому спостерігається корона.

Для визначення тривалості корони у реальному часі ці засоби не можуть бути задіяні, оскільки для цього їх необхідно постійно тримати над відповідною ділянкою ЛЕП чи під нею.

Застосування таких пристроїв ускладнює обладнання. Даний недолік може бути усунений при вимірюванні випромінювання що розповсюджується у самому дроті фази.

Згідно [5] джерелом радіоперешкод є коронні розряди на дротах фаз, ізоляторах або арматурі. Вони формують імпульси струму, що надходять у дроти фаз. Ці імпульси розповсюджуються вздовж дроту у обох напрямках. В однодротовій лінії, що проходить над землею, здійснюється одночасне розповсюдження хвилі напруги $U(t)$ та хвилі струму $I(t)$ перешкод. На кожній заданій частоті ω обидві величини пов'язані поміж собою рівнянням [5]

$$U(\omega) = Z \cdot I(\omega), \quad (1)$$

де Z – хвильовий опір ЛЕП, що є функцією від ω .

Послаблення при розповсюдженні хвиль визначається загальним коефіцієнтом a [5]:

$$U_x = U_0 e^{-ax}, \quad (2)$$

$$I_x = I_0 e^{-ax}, \quad (3)$$

де U_0 і I_0 – амплітуди напруги і струму джерела перешкод відповідно; x – відстань вздовж ЛЕП.

Однак для вимірювання випромінювання, що розповсюджується в дроті фази необхідно застосувати спеціальні засоби для узгодження низьковольтних вхідних кіл вимірювального пристрою з дротом фази, що знаходиться під високою напругою.

Слід також відмітити низький рівень послаблення цих хвиль вздовж дроту ЛЕП. Згідно [5] для різних мод коливань послаблення змінюється від 1 до 4 дБ/км. У зв'язку з цим даний вид коливань може бути застосований для визначення наявності та тривалості корони вздовж усієї лінії ЛЕП. Але для визначення втрат електричної енергії на корону у реальному часі цього не достатньо. Необхідно визначити довжину ланки ЛЕП з короною на її фазових дротах.

Нами пропонується вирішення даної задачі здійснювати шляхом вимірювання акустичних коливань які розповсюджуються у дротах фаз. Як показано у роботі [3] розповсюдження акустичних коливань у елементах розподільчих пристроїв (ізоляторах) з успіхом може бути використане для діагностування наявності корони на цих елементах.

Методи вібраційно-акустичного діагностування машин та механізмів широко використовуються в науковій та інженерній практиці [6]. Все розмаїття коливаньних процесів у механічній системі може бути представлено у формі вимушених та власних коливань [6]. Ділянку фазового дроту, яка розміщена між опорами ЛЕП, можна розглядати як суцільний циліндр – пружний хвильвід, у якому коронним розрядом генеруються імпульси власних коливань.

Розповсюдження акустичних коливань у пружних хвильводах досліджується протягом більш ніж 125 років [7].

Задача про розповсюдження акустичних пружних коливань у хвильводі – дроті фази зводиться до:

- задачі про випромінювання в хвильвід коливань точкового джерела коливань з його поверхні в тіло циліндра;
- задачі про випромінювання в хвильвід коливань кільцевого джерела коливань з його поверхні в тіло циліндра;
- задачі про випромінювання в хвильвід коливань системи кільцевих джерел коливань з його поверхні в тіло циліндра.

Вид джерела коливань визначається ступенем розвиненості корони на дроті фази.

Процес розповсюдження коливань у пружному циліндричному хвильводі описується рівнянням Гельмгольца в циліндричних координатах r, z, ϕ для потенціалу швидкості ψ [8]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 \psi = 0. \quad (4)$$

З граничною умовою

$$-\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{r=a} = v_0(z) \quad (5)$$

і умовою випромінювання

$$\psi(r, z) \xrightarrow{z \rightarrow \pm \infty} 0, \quad (6)$$

де $v_0(z)$ – комплексна амплітуда швидкості поверхні джерела коливань;

$k = \omega/c$ – хвильове число;

a – радіус циліндра;

c – фазова швидкість у вільному просторі.

Для джерела коливань у формі циліндричного кільця висотою $2h$ рішення рівняння (4) отримане у наступній формі [8]:

$$\begin{aligned} \psi(z, r) = & \frac{v_0}{\pi} \sum_{m=1}^{p-1} \frac{[\sin(k_{0m} h) c h(\delta_{0m} h) + \cos(k_{0m} h) sh(\delta_{0m} h)] \mathfrak{I}_0(\pi \alpha_{0m} r / a)}{(k_{0m} + \delta_{0m})^2 \mathfrak{I}_0^2(\pi \alpha_{0m})} \times \\ & \times e^{-\delta_{0m} z} e^{-j k_{0m} z} + \frac{v_0}{\pi} \frac{sh(\delta_{0p} h) \mathfrak{I}_0(\pi \alpha_{0p} r / a)}{\delta_{0p}^2 \mathfrak{I}_0^2(\pi \alpha_{0p})} e^{-\delta_{0p} z} + \\ & + \frac{v_0}{\pi} \sum_{m=p+1}^{\infty} \frac{sh \left[\left(k_{0m}^- + \delta_{0m} \right) h \right] \mathfrak{I}_0(\pi \alpha_{0m} r / a)}{(k_{0m} + \delta_{0m})^2 \mathfrak{I}_0^2(\pi \alpha_{0m})} e^{-(k_{0m} + \delta_{0m}) z}, \quad (7) \end{aligned}$$

де $p = 2, 3, 4, \dots$;

δ_{0m} – коефіцієнт природного затухання середовища в $0m$ -ї хвилі;

α_{0m} – корні рівняння $\mathfrak{J}'_{0m}(\pi \alpha) = 0$;

$$k_{0m} = (2\pi f / c) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha_{0m} c}{2af} \right)^2};$$

f – частота;

$$\bar{k}_{0m} = -\sqrt{\left(\frac{\pi \alpha_{0m}}{a} \right)^2 - k^2}.$$

Складові першої суми рівняння (7) описують бігучі хвилі. Кожна з цих хвиль розповсюджується з фазовою швидкістю

$$c_{0m} = c / \sqrt{1 - [\alpha_{0m} c / (2af)]^2}$$

в обох напрямках від джерела коливань.

При заданому співвідношенні c/a [8] є можливість отримати чисті пласкі хвилі зі звичайною швидкістю c . Для цих хвиль частота повинна бути менше $f_{02} = c\alpha_{02}/(2a)$.

Таким чином для пласких хвиль у циліндрі діє слідуючий критерій [8]: $f < c\alpha_{02}/(2a)$; $\alpha_{02} = 1,2197$.

Отже, дрот фази ЛЕП може розглядатися як хвильвід для акустичних гармонічних коливань.

Згідно [3] коронний розряд на елементах розподільчого пристрою генерує у повітрі та у його елементах коливання на частоті 50 Гц та кратних цій частоті.

Коронний розряд на дроті фази за принципом реалізації є джерелом імпульсів з частотою 100 Гц. Тому під дією цих імпульсів у дроті фази будуть збуджуватись коливання у формі відгуку на цю імпульсну дію. Дія одиничного миттєвого імпульсу $g(t)=\delta(t-t')$, що прикладується в момент часу $t = t'$ при нульових початкових умовах, викликає реакцію у формі [6]:

$$h(t-t')=1/\omega_c e^{-\alpha(t-t')} \sin \omega_p(t-t'), t \geq t', \quad (6)$$

де $h(t)$ – імпульсна перехідна функція хвильоводу;
 ω_c – власна частота системи без тертя;
 ω_p – власна (резонансна) частота демпфованої системи;

α – коефіцієнт затухання.

Рішення рівняння (4) в загальному вигляді для будь-якої форми дії $g(t)$ можна отримати з допомогою інтеграла Дюамеля [6]:

$$x(t)=\int_0^t h(t,t')g(t')dt'. \quad (6)$$

При малому затуханні в системі ($\omega_c \approx \omega_p$) реакцію $x(t)$ на δ -імпульс можна представити у вигляді [6]

$$x(t)=1/\omega_c e^{-\alpha(t)} \sin \omega_c(t), t > 0. \quad (7)$$

Дія періодичних δ -імпульсів на механічну систему збуджує в ній перехідні процеси на власній резонансній частоті ω_c . Вид процесу має форму затухаючого процесу, характерного для амплітудно-імпульсної модуляції (АІМ) [6].

Відгук системи на періодичну послідовність імпульсів з частотою слідування імпульсів Ω має спектр комбінаційних частот $\omega_c \pm k\Omega$ з огинаючою в формі резонансної кривої гармонічного осцилятора [6].

Тому вимірювання акустичних коливань в дроті фази пропонується проводити саме на частоті $2 \cdot \omega_c$.

Висновки. Таким чином, найбільш раціональним методом визначення тривалості коронного розряду на ділянці ЛЕП, на думку автора, є метод вібраційно-акустичної діагностики дроту фази. Цей метод передбачає спостереження за наявністю у заданій ділянці дроту фази амплітудно модульованих імпульсних коливань на резонансній частоті ділянки дроту фази. Наявність таких імпульсів коливань з частотою слідування імпульсів Ω беззаперечно свідчить про наявність на дроті фази місцевої або ж розвиненої корони. Причому, амплітуда імпульсів залежить від рівня розвиненості корони. Тому може бути отримана інформація не тільки про наявність чи відсутність корони, але й про рівень її розвиненості вздовж дроту фази.

Слід також відмітити, що частота власних коливань ділянки фазового дроту поміж опорами ЛЕП залежить від наявності на поверхні дроту відкладень у формі мокрої плівки дощу, снігу, ожеледі. Тому спостереження за власною резонансною частотою ділянки фазового дроту між опорами ЛЕП дасть інформацію про наявність на її поверхні цих відкладень.

Список використаних джерел

1. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров/ – М.: Издательство: Советская энциклопедия 1984. – 944 с.

2. Богданов Ю. В. К вопросу дефектировки изоляторов контактной сети / Ю. В. Богданов, В. Г. Рогацкий // Вестник ВНИИЖТ – 2003. – № 3 Режим доступа к журналу:

<http://www.css-rzd.ru/vestnik-vniizht/v2003-3/v3-6.htm>

3. Iwa Garniwa MK, Aji Nur Widyanto, Hanif Corona Detection on High-Voltage Switch Gear Based on Acoustic Noise Frequency and Spectrum Analysis Режим доступа до статті: <http://staff.ui.ac.id/internal/131845377/publikasi/CoronaDetectiononHigh-VoltageSwitchGearBased-IwaGarniwaAjiNur.pdf>.

4. Арбузов Р. С. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи / Р. С. Арбузов, А. Г. Овсянников. – Новосибирск: Наука, 2009. – 136 с. Ил. 93. Таб. 15. Библи. 130 назв.

5. Совместимость технических средств электромагнитная радиопомехи промышленные от воздушных линий электропередачи и высоковольтного оборудования: – Описание физических явлений: руководящий документ по стандартизации. – Группа Е02. – Методические указания: – РД 50-723-93 (СИСПР 18-1). – (Дата введения 01.07.93). Госстандарт РФ. 1993. – 71с.

6. Генкин М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова – М. Машиностроение. 1987.- 288 с.: ил.

7. Мелешко В. В. Упругие волноводы: история и современность. I / В. В. Мелешко, А. А. Бондаренко, С. А. Довгий и др. // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2008.–51. № 2. – с. 86-104.

8. Лепендин Л. Ф. Акустика: Учебное пособие для втузов / Леонтий Федорович Лепендин. – М.: Высш. школа. 1978. – 448 с., ил.

Аннотация

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ЛЭП В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Доценко М. С.

Предложен метод определения длительности коронного разряда на ЛЭП путем измерения акустического излучения короны в провод фазы

Annotation

METHODS OF DETERMINATION OF DURATION OF CORONA DIGIT ON LEP IN REAL TIME

M. Dotsenko

Offered method of determination of duration of corona digit on LEP by measuring of acoustic radiation of crown in the wire of phase.